UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

GUNNAR BEDICKS JUNIOR

SINTONIZADOR-DEMODULADOR PARA O SISTEMA
BRASILEIRO DE TV DIGITAL

SÃO PAULO

2008

GUNNAR BEDICKS JUNIOR

**SINTONIZADOR-DEMODULADOR PARA O
SISTEMA BRASILEIRO DE TV DIGITAL**

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo para a obtenção do título de Doutor em
Engenharia Elétrica

Área de Concentração: Sistemas Eletrônicos

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Knörich Zuffo

São Paulo

2008

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

FICHA CATALOGRÁFICA

Bedicks Junior, Gunnar

**Sintonizador-demodulador para o sistema brasileiro de TV digital
/ G. Bedicks Junior. -- São Paulo, 2008.
169 p.**

**Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos.**

**1. Televisão digital – Brasil 2. Modulação digital I. Universidade
de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de
Sistemas Eletrônicos II. t.**

FOLHA DE APROVAÇÃO

Gunnar Bedicks Junior

Sintonizador-Demodulador para o Sistema Brasileiro de TV Digital

Tese apresentada a Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo para a obtenção do título de Doutor.

Área de Concentração: Sistemas Eletrônicos

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____

Instituição _____ Assinatura _____

Prof. Dr. _____

Instituição _____ Assinatura _____

Prof. Dr. _____

Instituição _____ Assinatura _____

Prof. Dr. _____

Instituição _____ Assinatura _____

Prof. Dr. _____

Instituição _____ Assinatura _____

DEDICATÓRIA

À minha esposa, Heloisa pelo seu apoio, incentivo, dedicação e amor nestes anos de elaboração deste trabalho. A minha filha Flávia, uma dádiva de Deus, que completa de alegria a nossa família e as nossas vidas e que nos faz acreditar em um mundo sempre melhor.

AGRADECIMENTOS

Ao onisciente Deus, criador de todas as coisas e que em sua bondade e misericórdia permitiu que eu chegasse até aqui.

A minha mãe, pelas suas orações, carinho e amor que tanto demonstrou para com este seu filho e que sempre me incentivou nesta jornada acadêmica.

Ao prof. Pedro Ronzelli Júnior, vice-reitor da Universidade Presbiteriana Mackenzie, amigo e irmão de tantas lutas nestes últimos anos, e que sempre me incentivou a completar este trabalho.

Ao prof. Roque Theóphilo Júnior, ex-diretor da Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie e que me concedeu a oportunidade de coordenar o Laboratório de TV Digital.

Ao prof. Marcel Mendes, diretor da Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie que tem prestado todo o seu apoio às atividades desenvolvidas no Laboratório de TV digital e no desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores Carlos Eduardo da Silva Dantas, Francisco Sukys, Fujio Yamada e Cristiano Akamine, colegas da Escola de Engenharia e do Laboratório de TV Digital, que ao longo destes anos de convivência sempre me incentivaram e colaboraram para a conclusão deste trabalho.

Ao Jorge Costa, administrador do Laboratório de TV digital e companheiro de jornada nestes anos de TV digital.

Ao meu orientador prof. Marcelo Knörich Zuffo, que eu respeito e admiro pelo seu caráter, conhecimento e contribuição científica para o Brasil e o mundo, que me ensinou o verdadeiro valor da pesquisa e da responsabilidade de um pesquisador para com o seu país. Amigo e companheiro das incansáveis reuniões e discussões pelo Sistema Brasileiro de TV Digital.

Pela sua dedicação comigo, pelo seu cuidado e critério com os valores acadêmicos deste trabalho, por sempre estar disponível para me atender nas minhas dúvidas e lamentos, mas principalmente por ter dado a mim a oportunidade de desenvolver junto com ele este trabalho.

“Brumas e espumas.

Tudo são brumas e espumas...

Para tudo há um tempo determinado.

Há o tempo de nascer e o tempo de morrer. O tempo de plantar e o tempo de arrancar o que se plantou. O tempo de construir e o tempo de demolir. O tempo de chorar e o tempo de rir. O tempo de amar e o tempo de enfadar-se com o amor. O tempo de guerra e o tempo de paz. Para todas as coisas, há um tempo certo.

Mas Deus colocou o coração do homem para além do tempo, na eternidade.

Nada há de melhor para o homem do que alegrar-se e levar uma vida prazerosa. E isso é presente de Deus, que o homem possa comer, beber, e desfrutar do seu trabalho. O que é, já foi. E o que vai ser também já foi. Mas Deus fará voltar o que já passou.

Lembra-te do teu Criador nos dias da tua mocidade, antes que venham os maus dias e cheguem os anos que dirás: Não tenho neles prazer.

Antes que se escureçam o Sol, a Lua e as estrelas, luzes da tua vida, e tornem a vir as nuvens depois do aguaceiro;

No dia em que tremerem os guardas da casa, os teus braços,

E se curvarem os homens outrora fortes, as tuas pernas,

E cessarem de moer os moedores da tua boca, por já serem poucos,

E se cerrarem as janelas, os teus olhos,

E os teus lábios se fecharem: o dia em que não puderes falar em voz alta,

E te levatares ao canto das aves, e não mais ouvires o som da música.

Quando tiveres medo do que é alto,

E te espantares no caminho,

E o teu cabelo ficar branco,

E um simples gafanhoto for muito peso para suas forças,

E não tiveres mais fome.

Porque vais para a casa eterna e os pranteadores já estão andando pela praça.

Antes que se rompa o fio de prata,

E se despedace o copo de ouro,

E se quebre o cântaro junto a fonte,

E o pó volte à terra

E o sopro da vida volte a Deus, que o soprou.

Vai, pois, come com alegria o pão e bebe gostosamente o vinho. Em todo o tempo sejam brancas as tuas roupas e jamais falte óleo na tua cabeça. Goza a vida com quem tu amas todos os dias da tua vida que logo passa, como passam as brumas e as espumas...”

Rubem Alves (Eclesiastes)

RESUMO

O sintonizador-demodulador de RF, também chamado de *Front End*, é definido de uma forma geral como sendo o conjunto ou módulo que está entre a antena e o sistema digital. Para um receptor isto inclui todos os filtros, amplificadores de baixo ruído, misturadores e demoduladores, necessários para processar o sinal modulado recebido na antena, demodulá-lo e entregá-lo em um fluxo de bits (*Transport Stream*) para o sistema digital de decodificação, também conhecido com *Back End*. Por esta razão o sintonizador-demodulador é muitas vezes chamado de conversor RF para TS (Rádio Frequência para *Transport Stream*). Por ser o primeiro bloco, o *Front End* é a parte mais importante, e também a mais crítica de qualquer receptor contribuindo muito para o seu bom ou mau desempenho.

Esta tese investigou os problemas existentes e que degradam a qualidade do sinal nas transmissões de TV analógica; os testes realizados pelo laboratório de TV Digital do Mackenzie comparando os padrões de transmissão dos sistemas de TV Digital, ATSC, DVB-T e ISDB-T; o modelo proposto e adotado pelo Sistema Brasileiro de TV Digital; e propôs um modelo de sintonizador-demodulador para o SBTVD, que atendesse as necessidades do sistema com robustez e flexibilidade. O sintonizador-demodulador foi desenvolvido, projetado, montado e testado no laboratório e no campo para avaliar a sua eficiência.

ABSTRACT

The RF front end is generally defined as everything between the antenna and the digital baseband system. For a receiver, it includes all the filters, low-noise amplifiers (LNAs), down-conversion mixers and demodulator needed to process the modulated signals received at the antenna into signals suitable for input into the baseband analog-to-digital converter (ADC), demodulate it and feed with a Transport Stream the Back End part of the system to decode the signal. For this reason, the RF front end is often called the RF-to-TS portion of a receiver. It turns out that this is the most important and critical part of the whole receiver aiming for its good or bad performance.

This thesis researched the existing problems that degenerate the analog TV transmission quality; the digital TV tests realized by Mackenzie DTV laboratory comparing the digital TV transmission standards, ATSC, DVB-T and ISDB-T; the proposed and adopted model for the Brazilian Digital TV System; and a proposal of a Front End for the SBTVD that meets the requirements of the system with robustness and flexibility. The Front End was designed, assembled and tested in the DTV laboratory and in the field.

SUMÁRIO

1. Introdução.....	1
1.1.Objetivos.....	3
1.2.Motivação.....	3
1.2.1. Motivação Pessoal.....	4
1.3.Tese.....	4
1.4.Metodologia.....	5
1.5.Organização da Tese.....	5
2. Transmissão Analógica de TV.....	7
2.1. Trajetória do Laboratório de TV Digital do Mackenzie.....	7
2.2. O Espectro Eletromagnético de Frequências.....	17
2.3. A Propagação do Sinal de TV.....	22
2.4. Medidas de Campo do Sinal Analógico de TV.....	23
2.5. Conclusão do Capítulo.....	32
3. Estado da Arte em Transmissão Digital.....	33
3.1. Transmissão Analógica <i>versus</i> Transmissão Digital.....	34
3.2. O Sistema Norte-Americano ATSC.....	38
3.3. O Sistema Europeu DVB-T.....	40
3.4. O Sistema Japonês ISDB-T.....	42
3.5. O Sistema Chinês DMB-T.....	44
3.6. O Relatório Final dos Testes de TV Digital em 2000.....	47
3.7. Critérios Técnicos para a Canalização da TV Digital no Brasil.....	49
3.7.1. Canalização para a TV Digital no Brasil.....	50
3.7.2. Máscara do Espectro de Transmissão para a TV Digital.....	52
3.7.3. Classificação das Estações de Transmissão Digital.....	54
3.7.4. Contorno Protegido.....	55
3.7.5. Relações de Proteção.....	55
3.7.5.1. Interferência do Canal Digital no Analógico.....	55

3.7.5.2.	Interferência Canal Analógico no Digital.....	56
3.7.5.3.	Interferência Canal Digital no Digital.....	58
3.8.	Conclusão do Capítulo.....	59
4.	O Sistema Brasileiro de TV Digital – SBTVD	60
4.1.	Transmissão Terrestre – N01	62
4.2.	Codificação de Áudio e Vídeo – N02	66
4.2.1.	Principais Parâmetros de Áudio.....	66
4.2.2.	Principais Parâmetros de Vídeo.....	69
4.3.	Multiplexação e Sistema de Informação.....	71
4.4.	Receptores – N04	73
4.5.	Gestão de Direitos Digitais –N05	76
4.6.	Codificação de Dados – <i>Middleware</i> – N06	77
4.7.	Canal de Interatividade – N07	78
4.8.	Conclusão do Capítulo.....	80
5.	Proposta de um Sintonizador-Demodulador para o SBTVD.....	81
5.1.	Fatores que Caracterizam o Desempenho dos Sintonizadores TV..	81
5.1.1.	Faixa Dinâmica.....	83
5.1.1.1.	Sensibilidade.....	83
5.1.1.2.	Intermodulação.....	84
5.1.2.	Ruído de Fase.....	85
5.1.3.	Figura de Ruído.....	86
5.1.4.	Respostas a Espúrios (Distorção).....	87
5.1.5.	Rejeição a Frequência Imagem.....	88
5.2.	O Legado dos Sintonizadores de TV.....	88
5.3.	O Sintonizador-Demodulador.....	92
5.3.1.	O Misturador.....	92
5.3.2.	O Sintonizador de Conversão Simples.....	93
5.3.3.	A Frequência Imagem.....	94
5.3.4.	A Frequência Imagem com Conversão para Cima.....	97

5.3.5. O Sintonizador de Dupla Conversão.....	98
5.3.6. A Sintonia dos Canais de TV.....	99
5.4. O Sintonizador de Silício.....	103
5.5. O Demodulador ISDB-T _B	108
5.6. O Projeto do Sintonizador-Demodulador para o ISDB-T _B	109
5.7. Testes de Laboratório do MackNim.....	113
5.7.1. Faixa Dinâmica.....	115
5.7.2. Rejeição a Interferências de Canais Adjacentes.....	115
5.7.3. Rejeição a Interferência de Co-Canal.....	119
5.8. Testes de Campo com o MackNim.....	119
5.9. Conclusão do Capítulo.....	126
6. Conclusões.....	127
6.1. Resultados da Tese.....	127
6.2. Trabalhos Futuros.....	129
Referências.....	130
Anexos.....	136
A. Modulação Multiplexada por Divisão de Frequências	
Ortogonais – OFDM.....	136
A.1. Introdução.....	136
A.2. O Sistema de Modulação de Portadora Única.....	137
A.3. O Sistema de Modulação “Multiplexação por Divisão de	
Frequências.....	138
A.4. Ortogonalidade e OFDM.....	139
A.5. O Sinal OFDM.....	140
A.6. O Prefixo Cíclico.....	144

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Capítulo 1

Figura 1.1. Espectro de RF dos canais de TV na cidade de São Paulo.....	2
---	---

Capítulo 2

Figura 2.1. Ministro das Comunicações Hélio Costa durante cerimônia de assinatura do Decreto sobre a implantação do SBTVD (Fonte: Revista da SET, Edição 87).....	16
Figura 2.2. Cronograma de digitalização conforme Portaria N°652.....	16
Figura 2.3. Absorção atmosférica.....	17
Figura 2.4. Bandas de frequências ITU.....	18
Figura 2.5. Atribuições de faixas de frequências no Brasil – VHF e UHF.....	21
Figura 2.6. Canais analógicos de TV alocados no Brasil.....	22
Figura 2.7. Percursos da propagação.....	23
Figura 2.8. Unidade móvel de medidas de campo.....	24
Figura 2.9. Clusters e torres de transmissão das redes de TV em São Paulo.....	24
Figura 2.10. Pontos de medida do sinal analógico em São Paulo.....	25
Figura 2.11. Qualidade subjetiva da imagem ITU-R BT.500-11.....	26
Figura 2.12. Qualidade do sinal analógico da TV Cultura.....	27
Figura 2.13. Qualidade do sinal analógico do SBT.....	28
Figura 2.14. Qualidade do sinal analógico da TV Globo.....	28
Figura 2.15. Qualidade do sinal analógico da TV Record.....	29
Figura 2.16. Qualidade do sinal analógico da Rede TV.....	29
Figura 2.17. Qualidade do sinal analógico da TV Gazeta.....	30
Figura 2.18. Qualidade do sinal analógico da TV Bandeirantes.....	30

Capítulo 3

Figura 3.1. Transmissão analógica versus digital.....	35
Figura 3.2. Flexibilidade do sistema de transmissão digital.....	36
Figura 3.3. Sistema de transmissão.....	37
Figura 3.4. Transmissão no modo 8K com intervalo de guarda.....	43
Figura 3.5. Segmentação do canal de 6 MHz.....	43
Figura 3.6. Exemplo de transmissão hierárquica com banda segmentada.....	44

Figura 3.7. Cronograma para a implantação do sistema chinês de TV digital.....	45
Figura 3.8. Diagrama de blocos do sistema de transmissão chinês para a TV digital.....	46
Figura 3.9. Deslocamento de frequência do canal digital.....	50
Figura 3.10. Máscara de transmissão.....	53
Figura 3.11. Relações de proteção do canal digital no analógico.....	56
Figura 3.12. Relações de proteção do canal analógico no digital.....	57
Figura 3.13. Relações de proteção do canal digital no digital.....	58

Capítulo 4

Figura 4.1. ISDB-T _B	61
Figura 4.2. Transmissão OFDM com banda segmentada: BST-OFDM.....	62
Figura 4.3. Flexibilidade de serviços.....	63
Figura 4.4. Diagrama de blocos do sistema de transmissão ISDB-T _B	64
Figura 4.5. Espectro de RF Alocado para TV Digital.....	66
Figura 4.6. Multiplexador	72
Figura 4.7. Re-multiplexador.....	72
Figura 4.8. <i>Transport Stream Packet</i>	72
Figura 4.9. Quadro multiplexado.....	73
Figura 4.10. Configuração básica de um receptor ISDB-T _B	76
Figura 4.11. Estrutura do ambiente de aplicação GINGA.....	78

Capítulo 5

Figura 5.1. Desempenho dos sintonizadores para TV.....	82
Figura 5.2. Sintonizador de dupla conversão.....	86
Figura 5.3. Espectro dos canais de TV na banda de UHF em São Paulo.....	89
Figura 5.4. O legado dos sintonizadores convencionais.....	90
Figura 5.5. O sintonizador convencional.....	91
Figura 5.6. Diagrama de blocos do módulo de sintonia e demodulação.....	92
Figura 5.7. O misturador.....	93
Figura 5.8. Sintonizador de conversão simples.....	94
Figura 5.9. Frequência imagem.....	95
Figura 5.10. Espectro da frequência imagem.....	95
Figura 5.11. O filtro de frequência imagem	96
Figura 5.12. Misturador com conversão para cima.....	97

Figura 5.13. Sintonizador com dupla conversão.....	98
Figura 5.14. Sintonia de um canal de TV.....	100
Figura 5.15. Frequências imagens na dupla conversão.....	101
Figura 5.16. Filtro da frequência imagem.....	102
Figura 5.17. Sintonizador de silício.....	104
Figura 5.18. Sintonizador de silício.....	104
Figura 5.19. Sintonizador de silício MT2131.....	105
Figura 5.20. MT2131: Sensibilidade.....	106
Figura 5.21. MT2131: Rejeição a frequência imagem.....	106
Figura 5.22. MT2131: Rejeição a ICA.....	107
Figura 5.23. MT2131: Figura de ruído.....	107
Figura 5.24. TC90A87: Diagrama de blocos do demodulador.....	109
Figura 5.25. Diagrama de blocos do sintonizador-demodulador.....	110
Figura 5.26. Esquema elétrico do MackNim.....	111
Figura 5.27. Projeto do MackNim, sintonizador-demodulador.....	112
Figura 5.28. Placa de referência para controlar o MackNim com o PC.....	112
Figura 5.29. Software utilizado para controlar a placa de referência do MackNim.....	113
Figura 5.30. Pilha do SBTV: Condições de contorno.....	114
Figura 5.31. Testes de laboratório do MackNim.....	114
Figura 5.32. Faixa dinâmica.....	115
Figura 5.33. ICAN-1 analógico no digital.....	116
Figura 5.34. ICAN+1 analógico no digital.....	116
Figura 5.35. Relações de proteção UHF analógico no digital.....	117
Figura 5.36. Relações de proteção UHF digital no digital.....	117
Figura 5.37. ICAN-1 digital no digital.....	118
Figura 5.38. ICAN+1 digital no digital.....	118
Figura 5.39. <i>Clusters</i> e ponto central da campanha de testes.....	120
Figura 5.40. Pontos onde foram realizadas as medidas na região metropolitana de São Paulo.....	120
Figura 5.41. SBT, canal 28 digital, medidas de campo.....	121
Figura 5.42. TV Globo, canal 18 digital, medidas de campo.....	122
Figura 5.43. TV Record, canal 20 digital, medidas de campo.....	122
Figura 5.44. Rede TV, canal 29 digital, medidas de campo.....	123
Figura 5.45. TV Gazeta, canal 17 digital, medidas de campo.....	123

Figura 5.46. TV Bandeirantes, canal 23 digital, medidas de campo.....	124
---	-----

Anexo A

Figura A.1. <i>Orthogonal Frequency Multiplex Data Transmission System</i>	135
Figura A.2. Espectro de uma modulação com portadora única.....	136
Figura A.3. Espectro do sinal FDM.....	137
Figura A.4. Modulador e demodulador OFDM.....	140
Figura A.5. Densidade espectral de potência; OFDM versus FDM.....	142
Figura A.6. Espectro de potência típico de um sinal OFDM.....	142
Figura A.7. Sistema de comunicação OFDM.....	143
Figura A.8. Interferência IFI em sistemas OFDM.....	144

LISTA DE TABELAS

Capítulo 2

Tabela 2.1 - Nomenclatura ITU.....	19
Tabela 2.2 - Faixas de frequências e canais destinadas ao serviço de radiodifusão de sons e imagens.....	21
Tabela 2.3 - Resultado das medidas de campo quanto a qualidade subjetiva da imagem..	31

Capítulo 3

Tabela 3.1 – Canalização digital.....	51
Tabela 3.2 – Especificações das máscaras do espectro de transmissão digital.....	53
Tabela 3.3 – Potência ERP para as classes de transmissão e distâncias ao contorno protegido.....	54
Tabela 3.4 – Intensidade de campo no limite do contorno protegido.....	55
Tabela 3.5 – Relação de proteção do canal digital no analógico.....	56
Tabela 3.6 - Relação de Proteção do canal analógico no digital.....	57
Tabela 3.7 - Relação de proteção do canal digital no digital.....	58

Capítulo 4

Tabela 4.1 – Flexibilidade.....	63
Tabela 4.2 - Parâmetros do ISDB-T _B	65
Tabela 4.3 – Perfil de áudio MPEG-4 AAC para serviços fixos e móveis.....	68
Tabela 4.4 - Perfil de áudio para o serviço portátil (1Seg).....	69
Tabela 4.5 – Resoluções de luminância.....	69
Tabela 4.6 - Taxa de quadro.....	69
Tabela 4.7 – Área de codificação.....	70
Tabela 4.8 - Restrições de codificação para os dispositivos portáteis.....	70
Tabela 4.9 – Resoluções para 1Seg.....	71
Tabela 4.10 – Configuração do quadro multiplexado.....	73

Capítulo 5

Tabela 5.1 – Resumo dos pontos medidos e a classificação ITU.....	124
Tabela 5.2 – Resumo dos pontos medidos para o contorno de 5 km e a classificação ITU.....	125

Tabela 5.3 – Resumo dos pontos medidos para o contorno de 10 km e a classificação ITU.....	125
Tabela 5.4 - Resumo dos pontos medidos para o contorno de 20 km e a classificação ITU.....	125
Tabela 5.5 – Resumo dos pontos medidos para o contorno de 30 km e a classificação ITU.....	125

LISTA DE SIGLAS

AC	<i>Alternating Current</i> (frequência acima de 0 Hz)
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADC	<i>Analog to Digital Converter</i>
AFC	<i>Automatic Frequency Control</i>
AM	<i>Amplitude Modulation</i>
API	<i>Application Programming Interface</i>
ARIB	<i>Association of Radio Industries and Businesses</i>
ASK	<i>Amplitude Shift Keying</i>
AWGN	<i>Additive White Gaussian Noise</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i>
CF	<i>Crest Factor</i> (relação potência de pico pela potência média de uma portadora de RF)
DC	<i>Direct Current</i> (0 Hz)
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i>
DPSK	<i>Differential Phase Shift Keying</i>
DSP	<i>Digital Signal Processing</i>
DTCP	<i>Digital Transmission Content Protection</i>
EBNR	<i>Energy per Bit to Noise Ratio</i>
EPG	<i>Electronic Program Guide</i>
FDM	<i>Frequency Division Multiplexing</i>
FEC	<i>Forward Error Correction</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FIR	<i>Finite Impulse Response</i> (filtro digital)
FM	<i>Frequency Modulation</i>
F_s	<i>Sampling Frequency</i>
FSK	<i>Frequency Shift Keying</i>
HDCP	<i>High Bandwidth Content Protection</i>
HDTV	<i>High Definition Television</i>
ICA	Interferência de Canal Adjacente
ICI	<i>Inter-Carrier Interference</i>

IF	<i>Intermediate Frequency</i>
IFFT	<i>Inverse Fast Fourier Transform</i>
IMD	<i>Inter-Modulation Distortion</i>
IQ	<i>Inphase Quadrature</i>
ISI	<i>Inter-Symbol Interference</i>
I²C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
LIBRAS	Língua Brasileira de Sinais
LO	<i>Local Oscillator</i>
LOS	<i>Line Of Sight</i>
MPEG	<i>Moving Picture Experts Group</i>
NBR	Norma Brasileira
NF	<i>Receiver Noise Figure</i>
OBO	<i>Output power Back Off</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
PAPR	<i>Peak to Average Power Ratio</i>
PLL	<i>Phase Locked Loop</i>
PMT	<i>Program Map Tables</i>
PRC	<i>Peak Reduction Carriers</i>
PRS	<i>Pseudo Random Sequence</i>
PSK	<i>Phase Shift Keying</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QOS	<i>Quality Of Service</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>
RC	<i>Raised Cosine</i>
RF	<i>Radio Frequency</i>
RMS	<i>Root Mean Squared</i>
SFN	<i>Single Frequency Network</i>
SIR	<i>Signal to Interference Ratio</i>
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i>
SAW	<i>Surface Acoustic Wave</i>
SCMS	<i>Serial Copy Management System</i>
SPDIF	<i>Sony/Philips Digital Interface</i>
TDM	<i>Time Division Multiplexing</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>

VSB *Vestigal Side Band*

W *Watt* (energia por unidade de tempo, ou, joule por segundo)

LISTA DE SÍMBOLOS

b/s/Hz	<i>Bits per second per hertz (unidade de eficiência espectral)</i>
bps	<i>Bits per second</i>
dB	<i>Decibel</i>
dBc	<i>Decibel relative to main signal power</i>
dBm	<i>Decibel relative a 1 mW</i>
GHz	<i>Gigahertz - 10^9 Hz</i>
Hz	<i>Hertz</i>
K	<i>Kelvin</i>
kbps	<i>Kilo bits per second (10^3 bps)</i>
kHz	<i>Kilohertz - 10^3 Hz</i>
km	<i>Kilometer (10^3 m)</i>
λ	<i>Lambda – Comprimento de uma onda de RF</i>
m	<i>Metro</i>
Mbps	<i>Mega bits per second (10^6 bps) Mbps</i>
MHz	<i>Megahertz - 10^6 Hz</i>
π	<i>Pi (3.14159265)</i>
μm	<i>Micrometro (10^{-6} m)</i>
μs	<i>Microsegundo (10^{-6} s)</i>

1 Introdução

O modelo de transmissão analógico terrestre dos sinais de TV enfrenta diversos tipos de interferências que impossibilitam muitas vezes que o sinal que está sendo recebido por um receptor de TV resulte em uma boa qualidade de som e imagem. Desde o advento da TV analógica, nos anos 1930, estes problemas existem, porém, com muito maior intensidade nos dias de hoje com o adensamento populacional das grandes cidades. Antigamente os radiodifusores enfrentavam com maior frequência os problemas de desvanecimento e obstruções, o que muitas vezes era resolvido com uma melhor localização da antena transmissora e da potência irradiada. Hoje, aumentar a potência de transmissão não é solução porque muitas vezes pode aumentar a intensidade dos sinais refletidos (multipercurso), em prédios, pontes e viadutos, causando um resultado pior. O aumento da frota de veículos automotores e de eletrodomésticos que utilizam motores de escova, também contribui sobremaneira com as interferências no sinal de TV, provocando ruídos na recepção do sinal.

Além destas interferências que são provocadas pelo ambiente externo, existem também as interferências que são causadas pelos próprios equipamentos transmissores que muitas vezes irradiam sinais espúrios fora de seu canal, interferindo assim em outros canais da banda de TV e as interferências causadas por outros canais como interferências de co-canal¹, e interferências de canais adjacentes².

Para a escolha de um sistema de TV digital que satisfaça as condições de recepção existentes no Brasil é preciso considerar como de importância fundamental a utilização de antenas internas de baixo custo, compatíveis com as que se podem adquirir hoje no mercado interno, seja pela falta de recursos financeiros do usuário ou pela impossibilidade física de instalação de antenas externas no domicílio residencial. Se for agregado a esta realidade o fato de que os elementos interferentes no sinal de TV digital, tais como ruído impulsivo e distorção de multipercurso, estão presentes em quase todos os locais de recepção, e de forma muito agressiva, pode-se concluir que se trata realmente de um grande desafio evitar que estas interferências possam degradar a recepção dos sinais de TV digital a ponto de se interromper a recepção da imagem. Sob este ponto de vista, a realidade brasileira se mostra mais contundente que a dos países do primeiro mundo onde os atuais padrões de TV digital foram desenvolvidos. Não existe no Brasil uma legislação efetiva de controle das emissões de ruído

¹ Co-canal: canais distantes que interferem no mesmo canal desejado.

² Canais Adjacentes: canais existentes acima (N+1) e abaixo (N-1) do canal desejado, onde N é o canal desejado.

impulsivo, seja ele produzido por veículos com motores à ignição elétrica ou equipamentos eletrodomésticos. Quanto à distorção de multipercurso (ecos), a maioria das cidades brasileiras possui topografia irregular e grande número de prédios altos irregularmente distribuídos por toda a área urbana, gerando-se um número grande de ecos de alto nível. Acrescido a estes problemas, está o fato de que, ao contrário do que está acontecendo nos países do primeiro mundo, as antenas transmissoras dos vários canais de televisão não se concentram em uma torre única, mas estão espalhadas em várias posições dentro da cidade tornando impossível o uso de uma antena direcional apontada em uma única direção. Assim, quando as antenas transmissoras se localizam em direções diferentes, a mudança de um canal para outro traz uma configuração de ecos completamente diferente.

As afirmações constantes do parágrafo anterior podem ser comprovadas pelos resultados dos testes de laboratório e testes de campo realizados nos anos de 2000 a 2004, pelo laboratório de TV digital da Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie.

Figura 1.1. Espectro de RF dos canais de TV na cidade de São Paulo

A Figura 1.1 mostra o espectro de RF da banda de UHF na cidade de São Paulo, no dia 04 de abril de 2008, onde é possível observar os canais analógicos existentes, e alguns canais digitais já em operação. É possível também observar a complexidade de recepção dos canais de TV, haja vista a quantidade de canais existentes, as interferências de outros serviços, as interferências de outros canais distantes, as interferências dos canais adjacentes, e a transmissão simultânea dos canais analógicos e digitais.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é a pesquisa e o desenvolvimento de um sintonizador demodulador de sinais de TV para o Sistema Brasileiro de TV digital, utilizando técnicas avançadas, dispositivos especiais e as experiências adquiridas desde 1998 no trabalho de testes de laboratório e medidas de campo dos sinais analógicos e digitais de TV.

Os objetivos específicos podem ser descritos da seguinte forma:

- Pesquisar as imperfeições existentes no canal de transmissão dos sinais analógicos de TV;
- Identificar as interferências que mais degradam a transmissão analógica;
- Realizar os testes de campo do sinal analógico dos principais canais de TV da cidade de São Paulo;
- Comparar os resultados medidos nos pontos do campo de cada emissora, com o padrão ITU-R BT 500-11;
- Identificar para cada um dos índices do padrão ITU, o número de pontos e o percentual de cada um deles;
- Apresentar o estado da arte em transmissão de TV digital terrestre;
- Apresentar o Sistema Brasileiro de TV digital – SBTVD;
- Propor uma solução para o módulo de sintonia dos receptores de TV;
- Apresentar os resultados dos testes de laboratório e campo da solução proposta.

1.2 Motivação

Desde 1998 o laboratório de TV digital da Universidade Presbiteriana Mackenzie está envolvido com o processo da TV Digital no Brasil. Entre 1998 e 2000 dedicou-se a estudar, elaborar e realizar os testes de avaliação comparativa dos três sistemas de TV digital, então

existentes (ATSC³, DVB-T⁴ e ISDB-T⁵). Durante o congresso da NAB⁶ de 1999 em Las Vegas, Estados Unidos, pesquisadores da equipe tiveram a oportunidade de discutir a validade dos métodos de testes propostos com as equipes técnicas responsáveis pela criação dos sistemas ATSC e DVB-T.

Os resultados destes testes de laboratório e campo produziram três relatórios oficiais que foram publicados pela Anatel.

No momento em que o Brasil toma a decisão pela adoção do sistema de modulação utilizado do ISDB-T, BST-OFDM⁷ é imprescindível que a parte mais importante de um receptor de TV, o sintonizador, esteja adequada as características brasileiras, haja vista que existem diferenças relevantes entre o Brasil e o Japão no que diz respeito a canalização e transmissão dos sinais de TV, e que o uso de sintonizadores projetados e desenvolvidos para o Japão, podem mascarar os problemas e reduzir a eficiência do sistema de transmissão e, em alguns casos, até inviabilizar a recepção do sinal.

1.2.1 Motivação Pessoal

Os desafios são grandes porque o Brasil já há mais de décadas perdeu a característica de desenvolver componentes relacionados ao complexo eletrônico e conseqüentemente aos aparelhos de TV. Hoje os componentes de um televisor são em sua maioria importados em kits e montados na Zona Franca de Manaus, no estado do Amazonas.

Eu acredito que um componente tão importante quanto o sintonizador possa ser produzido no Brasil, reduzindo assim o valor das importações brasileiras e contribuindo sobremaneira com a balança comercial. Os sintonizadores-demoduladores representam atualmente em torno de 25% dos custos da lista de material de um conversor para TV digital e em torno de 3% dos custos da lista de material de uma TV digital.

1.3 Tese

O sintonizador-demodulador para o Sistema Brasileiro de TV digital pode ser desenvolvido a partir dos resultados obtidos dos testes de laboratório e campo, observando as características

³ ATSC: *Advanced Television Systems Committee*

⁴ DVB-T: *Digital Video Broadcasting - Terrestrial*

⁵ ISDB-T: *Integrated Services for Digital Broadcasting - Terrestrial*

⁶ NAB: *National Association of Broadcasters*

⁷ BST-OFDM: *Band Segmented Transmission – Orthogonal Frequency-Division Multiplex*

do espectro de RF dos canais de TV no Brasil e buscando alternativas tecnológicas que possam resolver os problemas de recepção do sinal digital.

1.4 Metodologia

A metodologia utilizada para a realização deste trabalho foi a seguinte:

- Pesquisa sobre as características de transmissão e propagação do sinal analógico de TV;
- Análise dos resultados dos testes de campo dos sinais analógicos de TV;
- Análise dos testes de laboratório e campo dos sistemas de TV digital (ATSC, DVB-T e ISDB-T);
- Pesquisa de soluções integradas para a recepção dos sinais de TV;
- Projeto e montagem de um protótipo do módulo sintonizador-demodulador utilizando sintonizador de silício;
- Projeto e montagem de um protótipo de uma placa de controle para o módulo;
- Testes de laboratório do módulo;
- Análise comparativa dos resultados obtidos com os sintonizadores convencionais⁸;
- Montagem do protótipo final do módulo;
- Testes de laboratório do módulo;
- Testes de campo do módulo;
- Análise dos resultados e conclusão.

1.5 Organização da Tese

Esta tese consiste de seis capítulos organizados conforme a descrição a seguir:

O Capítulo 1 apresenta a introdução, objetivos, motivações para essa pesquisa e trabalhos correlatos, descrevendo os testes e resultados que conduziram a proposta desta tese e ao desenvolvimento deste trabalho.

O Capítulo 2 apresenta a trajetória do Laboratório de TV Digital da Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie, um breve relato do caminho percorrido no Brasil rumo a adoção do sistema escolhido, o contexto da transmissão analógica do sinal

⁸ Sintonizadores convencionais: São sintonizadores de TV que utilizam componentes discretos montados dentro de compartimentos metálicos com o objetivo de blindar os circuitos de RF das emissões espúrias e sinais de RF existentes no ar.

de TV e suas características, a propagação do sinal e as necessidades para melhorar a qualidade do serviço dentro da área de cobertura pretendida. Mostra também os testes de campo da qualidade do sinal analógico realizados em 2004 e 2005.

O Capítulo 3 apresenta o estado da arte em transmissão de TV digital terrestre, destacando os sistemas existentes no mundo que foram objeto de testes nesta tese e as considerações que devem ser feitas na transição para a transmissão digital de TV.

O Capítulo 4 apresenta o Sistema Brasileiro de TV digital, SBTVD, o ISDB-T_B⁹, as normas escritas pelo módulo técnico do Fórum e a ABNT¹⁰.

O Capítulo 5 apresenta a proposta do sintonizador-demodulador para o SBTVD, as pesquisas realizadas para o seu desenvolvimento, o projeto do módulo, o projeto da placa de referência para o módulo, os testes de laboratório e os testes de campo realizados.

O Capítulo 6 apresenta os resultados obtidos com a solução proposta nesta tese. Também faz uma comparação entre a qualidade da imagem analógica recebida em um receptor de TV com o sintonizador convencional e a recepção digital utilizando o sintonizador-demodulador. Por fim, são apresentadas algumas propostas para pesquisas e desenvolvimentos futuros.

⁹ ISDB-T_B: Integrated Services for Digital Broadcasting Terrestrial Brazil

¹⁰ ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

2 Transmissão Analógica de TV

O objetivo deste capítulo é apresentar a trajetória do laboratório de TV digital da Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie, o contexto da transmissão analógica do sinal de TV e suas características, a propagação do sinal e os aperfeiçoamentos necessários para melhorar a qualidade do serviço dentro da área de cobertura pretendida.

2.1 Trajetória do Laboratório de TV Digital do Mackenzie e o Sistema Brasileiro de TV Digital

A introdução de um sistema de televisão digital vinha sendo objeto de estudos no Brasil desde 1991, quando o Ministério das Comunicações estabeleceu a Comissão Assessora para Assuntos de Televisão (COMTV) cuja tarefa principal era reunir governo e empresas de comunicação nos estudos e análise da então chamada “**TV de Alta Definição**”, acompanhando os trabalhos de implantação do sistema em outros países e as discussões no âmbito da União Internacional das Telecomunicações.

Dessa comissão faziam parte a ABERT¹¹, que naquele momento agregava todas as emissoras de rádio e televisão do país e a SET¹², entre outras entidades setoriais diretamente interessadas no desenvolvimento da tecnologia. Em 1994 surgiu o chamado “Grupo ABERT/SET” que centralizava seus esforços na pesquisa e desenvolvimento da TV digital no Brasil.

Em 1997, a perspectiva do início da implantação dos sistemas na Europa e EUA motivaram várias emissoras de televisão a solicitarem à Agência Nacional de Telecomunicações, ANATEL, autorizações especiais para testes de transmissão e recepção utilizando equipamentos que já estavam disponíveis no mercado internacional, com o objetivo de desenvolver o conhecimento das vantagens e problemas que a escolha de um eventual sistema de TV digital poderia trazer ao país.

Por orientação do Ministério das Comunicações, coube à Anatel estabelecer a coordenação destes pedidos, publicando então a Resolução No. 69 (ANATEL, 1998) que autorizava a realização de testes de TV digital em circuito fechado de caráter experimental, possibilitando desta forma que aquele grupo pudesse se organizar na construção de uma

¹¹ ABERT: Associação Brasileira das Empresas de Rádio e Televisão.

¹² SET: Sociedade de Engenharia de Televisão.

estação piloto e iniciar a execução de testes em sistemas de TV digital já em 1998. Esta mesma resolução, em seu artigo 3.2, autorizava expressamente a participação de universidades e centros de pesquisa tecnológica nos trabalhos de pesquisa de maneira a permitir que engenheiros brasileiros pudessem contribuir com sua experiência para o desenvolvimento do projeto.

Tão logo a autorização foi publicada, muitas empresas de tecnologia que também estavam interessadas no desenvolvimento dos testes manifestaram seu interesse em participar e juntaram-se ao já formado grupo ABERT/SET, a quem coube a missão de acompanhar o desenvolvimento, estudar, analisar e avaliar os sistemas de TV digital que se desenvolviam no mundo, bem como coordenar a realização dos testes no Brasil com o objetivo de colaborar no processo de definição do padrão a ser adotado no país.

As empresas de radiodifusão que compunham o grupo ABERT/SET indicaram para fazer parte do grupo diversos profissionais especializados e cientes das necessidades técnicas e comerciais do mercado de televisão aberta no Brasil, a ANATEL, nomeou a Fundação CPqD¹³, como sua representante junto ao grupo de pesquisas, com o objetivo de acompanhar os desenvolvimentos e complementar os estudos realizados consolidando os resultados obtidos.

Era consenso entre todos os participantes que o laboratório deveria ser construído em uma universidade que pudesse fornecer os recursos humanos necessários ao trabalho de coleta e processamento dos testes. Como a Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie gozava de grande prestígio em testes de campo e laboratório para diversas empresas de engenharia e seu corpo de professores era formado na sua maioria por engenheiros com experiência no mercado de trabalho, o convite foi feito ao Mackenzie na pessoa do então vice-reitor, prof. Marcel Mendes.

Com recursos oriundos dos incentivos governamentais da lei de informática o Mackenzie firmou então um Convênio de Cooperação Tecnológica com a NEC do Brasil, com o objetivo da montagem do laboratório, aquisição de equipamentos de testes, construção das instalações e a contratação do pessoal necessário ao projeto.

Segundo o prof. Mendes, este convite veio num momento especialmente importante, pois começava a esboçar-se uma mudança na filosofia educacional da Universidade Presbiteriana Mackenzie, que sempre tivera seus esforços voltados para uma experiência prática de seus alunos e nunca se dedicara efetivamente a trabalhos de pesquisa científica, e

¹³ CPqD: Centro de Pesquisa e Desenvolvimento

estava exatamente naquele momento iniciando diversos programas de incentivo a pesquisa em sistema de pós-graduação. A criação de um novo laboratório de pesquisa voltado para uma nova tecnologia seria um incentivo a mais para que esta mudança pudesse consolidar-se.

Sob a coordenação do diretor da Escola de Engenharia, prof. Roque Theóphilo Jr, foi nomeado coordenador do projeto o prof. Luiz Tadeu Mendes Raunheite e assim, constituiu-se o primeiro grupo de professores e alunos do Mackenzie, responsáveis pela montagem do laboratório e pelas pesquisas. Eram eles os professores Ana Cecília Munhoz Martins, Carlos Eduardo Dantas, Francisco Sukys, e Fujio Yamada, e os alunos Cristiano Akamine, Daniel da Costa Diniz, e Fábio Baiadori.

A montagem do laboratório levou cerca de seis meses, e incluiu a preparação dos sistemas irradiantes, a aquisição dos equipamentos de medição, a construção de uma “Gaiola de Faraday” e a montagem de uma unidade móvel para a medição dos sinais em campo.

Em 1998, o Congresso anual da SET trouxe ao Brasil o Eng^o Neil Pickford, do *Australian Communications Laboratory*, órgão assessor do Ministério das Comunicações Australiano, para que apresentasse os procedimentos desenvolvidos para os testes de TV digital na Austrália. Aquela apresentação serviu como importante referência para o trabalho dos pesquisadores do laboratório de TV digital já que os cenários nos dois países eram comparáveis em muitos aspectos e também porque até aquele momento, somente os engenheiros australianos haviam testado os problemas e distorções dos sinais digitais da forma que se imaginava necessário para os testes brasileiros.

Nas discussões que se seguiram, o grupo de pesquisadores do Mackenzie já em colaboração com a equipe do CPqD, optou por simular os canais digitais com a presença de multipercursos (fantasmas) e interferências, um modelo que avançava sobre os resultados obtidos pelos australianos e já vinha sendo desenvolvido em trabalhos anteriores pelo CPqD, ao pesquisar a segmentação da imagem digital para a avaliação da qualidade da transmissão. Isso levou a equipe a decidir pelo aprofundamento de alguns daqueles testes, comprando equipamentos de simulação mais sofisticados para garantir a fidelidade dos resultados brasileiros.

As definições dos métodos de ensaio, das tabelas de resultados que seriam apresentadas, e das seqüências dos testes de laboratório, tiveram o cuidado e o rigor científico de maneira que fosse possível simular todas as situações de interferência. Assim, foi permitido que se observasse em ambiente controlado, o comportamento do sinal digital aplicado as condições e realidades brasileiras, comparando o desempenho de cada sistema, os requisitos de proteção com relação aos co-canais e canais adjacentes nas situações: digital no

analógico, analógico no digital e digital no digital, e, além disso, todas as hipóteses de interferências do ambiente como os sinais multipercurso e os efeitos do ruído impulsivo.

Esta foi a fase mais intensa do processo, pois a inexistência à época de testes padronizados obrigava a discussão cuidadosa de cada parâmetro de comparação que pudesse ser utilizado de forma a gerar resultados que pudessem ser aceitos por todos os interessados, ou seja, os radiodifusores brasileiros, os representantes dos sistemas internacionais e a ANATEL. Entretanto, apesar do grande apoio institucional e corporativo ao projeto, para que os resultados fossem aceitos como válidos pela comunidade científica e tecnológica era preciso obter informações mais detalhadas junto às equipes técnicas dos padrões internacionais e para isso era necessário que especialistas estivessem acompanhando a evolução do trabalho e fornecendo informações relevantes para as comparações dos resultados.

Em fevereiro de 1999, foi submetido à ANATEL o estudo de viabilidade técnica dos canais que seriam utilizados em São Paulo, bem como as características de instalação e os equipamentos da estação transmissora. A autorização para execução do “Serviço Especial para Fins Científicos e Experimentais” e para a instalação da estação transmissora em São Paulo foi expedida em 30 de agosto de 1999, pelo Ato nº 4.609 (ANATEL, 1999), pela ANATEL.

Em abril de 1999 os pesquisadores do laboratório de TV digital do Mackenzie participaram em Las Vegas, nos Estados Unidos, da feira e congresso de radiodifusão “NAB 1999”, com o objetivo de apresentar para a comunidade mundial o projeto dos testes brasileiros e buscar a aproximação dos responsáveis pelos padrões internacionais, estabelecendo os necessários canais de comunicação.

No momento em que os pesquisadores brasileiros apresentavam os trabalhos desenvolvidos houve por parte dos representantes internacionais descréditos relacionados a iniciativa brasileira, sendo que alguns nem consideravam possível que os brasileiros pudessem gerar um relatório confiável. Testemunhas daquelas reuniões relatam que houve momentos de muita tensão onde o desconhecimento da realidade brasileira pelos responsáveis internacionais era tão grande que criava o risco de inviabilizar todo o projeto.

No entanto, com o passar dos dias, nas sucessivas reuniões que aconteceram, a equipe brasileira pode demonstrar que, além de confiáveis, os testes propostos seriam muito úteis para o desenvolvimento futuro dos padrões mundiais de TV digital e assim, com os acordos pretendidos, firmados, a equipe retornou ao Brasil com a certeza de que os testes seriam apoiados e respeitados internacionalmente.

Ainda em agosto de 1999 a equipe de pesquisadores apresentou o “Relatório Inicial” que descrevia em detalhes cada passo que seria seguido na execução dos testes de laboratório e de campo. Os testes de laboratório foram desenhados para cobrir uma gama de situações muito maior do que as que seriam verificadas nos testes de campo. Por sua vez, os resultados dos testes de campo funcionariam como um verificador dos dados que seriam obtidos nos testes de laboratório.

A instalação da estação transmissora foi concluída em vinte e sete de setembro de 1999, data em que foram iniciadas as transmissões e os ajustes finais para o início dos testes de campo. Os testes de laboratório foram iniciados em oito de outubro de 1999 e os testes de campo em oito de novembro de 1999.

Inicialmente havia-se planejado a realização de testes nas cidades do Rio de Janeiro e São Paulo, mas devido aos custos elevados para a instalação de duas estações de transmissão o grupo optou por realizar apenas os testes de São Paulo, que apresentava condições de densidade urbana e relevo que poderiam simular quaisquer situações, inclusive as existentes no Rio de Janeiro, de forma a colocar um verdadeiro desafio ao desempenho dos sistemas a serem testados. Assim a estação de transmissão foi montada nas instalações da antena da TV Cultura de São Paulo, no Sumaré, um bairro com tradição na história da televisão brasileira.

Para a continuidade do processo de pesquisa foram selecionados num grande mapa da cidade de São Paulo os 126 pontos onde seriam medidos os sinais recebidos, de maneira que se pudessem observar o maior número possível de situações reais de transmissão e recepção do sinal digital. Eram pontos que variavam muito em distância chegando até localidades na periferia da cidade, a mais de 30 km da antena de transmissão.

Para estes pontos deslocava-se uma viatura preparada com uma antena digital montada num braço telescópico e diversos aparelhos de recepção e medição do sinal segundo quatro esquemas principais: a) Comparação do desempenho de cobertura; b) Comparação em condições domésticas de recepção com simulação de situações reais como eletrodomésticos ligados e pessoas circulando nas proximidades da antena; c) Interferência no canal adjacente analógico e d) Interferência no canal adjacente digital.

Os testes iniciaram com apenas os sistemas ATSC¹⁴ e DVB-T¹⁵ que já haviam sido anunciados e estavam em fase inicial de implantação nos Estados Unidos e na Europa. Após o

¹⁴ ATSC: *Advanced Television System Committee*. Sistema de TV Digital terrestre adotado pelos Estados Unidos.

¹⁵ DVB-T: *Digital Video Broadcasting – Terrestrial*. Sistema de TV Digital terrestre adotado pela Europa.

início dos testes de campo surgiu a oportunidade de incluir o sistema japonês, ISDB-T¹⁶ que estava sendo lançado no Japão com inovações tecnológicas para a transmissão e recepção de sinais digitais para rádio e televisão, por um grupo de empresas coordenadas pelo “*NHK Science and Technical Research Laboratories*”.

O sistema havia sido desenvolvido como uma variante do padrão DVB-T e permitia a difusão integrada de sinais digitais em banda larga e banda estreita e assim apresentavam excelente potencial para a transmissão simultânea de sinais para receptores fixos e móveis.

Dessa forma os pontos de testes de recepção foram revisitados para que fossem feitas as medidas de campo com o sistema japonês.

Durante os trabalhos de pesquisa e testes, o laboratório de TV digital recebeu a visita de diversas delegações de pesquisadores, engenheiros e técnicos dos sistemas ATSC, DVB e ISDB que contribuíram consideravelmente com sugestões e críticas ao trabalho que estava sendo desenvolvido.

Os testes foram um marco para a engenharia de televisão no Brasil graças aos resultados positivos obtidos durante os trabalhos e a sua estreita colaboração com todas as entidades e pesquisadores envolvidos no projeto, criando um ambiente que facilitou a realização do trabalho. Uma das conquistas desta equipe foi a criação de um novo conjunto de procedimentos para testes de transmissão de TV digital em ambientes com multipercurso, que foi adotado pela ITU e incluído em seu documento “*Brazil Digital TV Testing Procedures*” (INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, 2003), e que hoje é utilizado como referência mundial.

Finalizados os trabalhos, o relatório final “**Testes em Sistemas de Televisão Digital – Relatório Final**” (LABORATÓRIO DE TV DIGITAL MACKENZIE, 2000) foi encaminhado a ANATEL que fez a sua publicação através da Consulta Pública N°216 de 18 de fevereiro de 2000 (ANATEL, 2000) e Consulta Pública N°237 de 2 de junho de 2000 (ANATEL, 2000).

No mês de julho de 2001, o prof. Gunnar Bedicks Junior, assumiu a coordenação do laboratório dando continuidade aos trabalhos que vinham sendo realizados e agregando novas atividades, trabalhando em testes para a indústria de equipamentos, em testes de digitalização para sistemas de TV paga, no desenvolvimento de sistemas da TV digital interativa por satélite, entre outros projetos, de forma que todo o conhecimento acumulado durante as pesquisas não ficasse desatualizado além de uma produção acadêmica muito rica, gerando

¹⁶ ISDB-T: *Integrated Services for Digital Broadcasting – Terrestrial*. Sistema de TV Digital terrestre adotado pelo Japão.

artigos em publicações, apresentações internacionais, teses de mestrado e doutorado.

Em 6 setembro de 2002 o então presidente da república, Fernando Henrique Cardoso, publicou a Exposição de Motivos(EM) Nº1.247, dando diretrizes para a escolha do padrão de TV digital para o Brasil.

A “EM Nº1247” estabelecia que a negociação das diversas contrapartidas comerciais, industriais e tecnológicas deveria contar com a participação do Ministério das Comunicações, do Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, juntamente com a ANATEL. Estabelecia ainda que, dentre outras condições, os detentores da tecnologia escolhida possibilitassem:

- Participação efetiva de representantes brasileiros, com direito a voto, nos organismos responsáveis pelo desenvolvimento das tecnologias adotadas;
- Suporte tecnológico à implantação de TV digital terrestre;
- Tratamento não discriminatório na transferência da tecnologia de TV digital terrestre aos diversos fabricantes nacionais, bem como, fornecimento de equipamentos e componentes em prazos, preços, quantidades e qualidades adequadas, com os eventuais e justos encargos de direito de propriedade intelectual (royalties);
- Compromisso de capacitação e treinamento dos técnicos brasileiros;
- Compromisso de incentivar integração dos sistemas de TV digital terrestre na América Latina.

A “EM Nº1247”, estabelecia ainda que deviam ser adotadas medidas objetivando:

- Estimular o crescimento do parque industrial nacional, sendo que os equipamentos de transmissão e televisores digitais sejam majoritariamente fabricados no país, em prazo a ser negociado com as indústrias instaladas no Brasil;
- Encetar ações para que o país amplie o seu parque industrial de fabricação de equipamentos de transmissão e televisores digitais visando a exportação;
- Manter a produção dos equipamentos analógicos durante todo o período de transição, assim como estimular a produção de unidades receptoras decodificadoras;
- Estimular a implantação, no país, de indústria de semicondutores.

(REVISTA DA SET, 2006)

Em 2003 houve grande quantidade de iniciativas no sentido de se propor a escolha de um modelo para a TV digital brasileira, dentre elas a do prof. Marcelo Zuffo, através do documento “TV DIGITAL ABERTA NO BRASIL - POLÍTICAS ESTRUTURAIS PARA UM MODELO NACIONAL” (ZUFFO, 2003) que propunha uma visão estrutural para o

modelo a ser adotado no país. Em audiência com o então Ministro das Comunicações, o prof. Zuffo apresentou sua sugestão da criação de um consórcio nacional para a pesquisa de um sistema para a TV digital no Brasil com nome de Sistema Brasileiro de TV digital.

No dia 3 de abril de 2003 o então Ministro das Comunicações, Miro Teixeira, encaminhou ao presidente da república a exposição de motivos MC00034EM (MINISTÉRIO DAS COMUNICAÇÕES, 2003), propondo diretrizes para a escolha do sistema. No dia 6 de junho de 2003 ocorre a primeira reunião conjunta com a presença de diversos representantes das universidades USP¹⁷ (LSI¹⁸, LARC¹⁹ e EF²⁰), UNICAMP²¹, PUC-RS²², UFPB²³ e UNISINOS²⁴, da Sociedade de Engenharia de Televisão, SET, do Pólo Tecnológico de Porto Alegre e do Ministério das Comunicações, com o objetivo de encaminhar ao governo uma proposta de consórcio entre as instituições para a escolha do sistema de TV digital para o Brasil. No dia 8 de agosto ocorre a primeira reunião técnica na UNICAMP com a presença de diversos representantes de universidades, centros de pesquisa e desenvolvimento, sociedades afins, e ministérios do governo, com o objetivo de se organizar um grande consórcio nacional para o desenvolvimento de um sistema brasileiro de TV digital. Todo este movimento culmina com o Decreto Presidencial Nº4901 de 26 de novembro de 2003 (PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA, 2003) instituindo o Sistema Brasileiro de TV Digital - SBTVD e dando outras providências, dentre elas uma de importante destaque que foi a indicação do FUNTTEL²⁵ como financiador dos projetos do SBTVD com o objetivo de estabelecer uma rede de competências nacional, promovendo a integração dos centros de pesquisa brasileiros para apresentar uma solução técnica inovadora, mantendo e aproveitando a compatibilidade com elementos já padronizados no mercado mundial de TV digital.

Através do financiamento de projetos articulados de pesquisa e desenvolvimento do SBTVD, um convênio firmado entre o FUNTTEL e a Fundação CPqD designava para o programa, em sua fase inicial, uma dotação orçamentária de R\$ 65 milhões, cabendo R\$ 15 milhões à Fundação CPqD e R\$ 50 milhões para a contratação de instituições de pesquisa em todo o país.

¹⁷ USP: Universidade de São Paulo.

¹⁸ LSI: Laboratório de Sistemas Integráveis.

¹⁹ LARC: Laboratório de Redes e Computadores.

²⁰ EF: Escola do Futuro.

²¹ UNICAMP: Universidade de Campinas

²² PUC-RS: Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

²³ UFPB: Universidade Federal da Paraíba.

²⁴ UNISINOS: Universidade do Vale dos Sinos.

²⁵ FUNTTEL: Fundo Tecnológico para o Desenvolvimento das Telecomunicações.

A FINEP²⁶, no início do ano de 2004, através da carta convite MC/MCT/FINEP/FUNTTEL - 01/2004 habilitou 83 instituições de ensino, pesquisa e desenvolvimento para participarem dos projetos do SBTVD e em seguida foram estabelecidas e emitidas cartas convites para sete áreas principais de pesquisa, a saber: a) Difusão e Acesso; b) Codificação de Sinal-Fonte; c) Camada de Transporte; d) Terminal de Acesso; e) Serviços, Aplicações e Conteúdo; f) Canal de Interatividade; g) *Middleware* e emitidas cartas convite para que as instituições pudessem apresentar suas propostas.

O Mackenzie atendeu a “CARTA-CONVITE MC/MCT/FINEP/FUNTTEL - 02/2004 – “Transmissão e Recepção, Codificação de Canal e Modulação” com o projeto “DIGITAL MULTIMEDIA MULTICASTING BROADCASTING – TERRESTRIAL”, tendo como co-executores o Laboratório de Sistemas Integráveis – LSI, da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Poli-USP), e o Laboratório de Vídeo – LAVID da Universidade Federal da Paraíba (UFPB). No dia 8 de outubro de 2004 o Comitê Assessor do FUNTTEL aprovou o projeto do Mackenzie.

Foram 21 consórcios que ao longo dos anos 2004, 2005 e 2006 desenvolveram os seus trabalhos de pesquisa e desenvolvimento, fornecendo subsídios relevantes para que o governo brasileiro pudesse tomar uma decisão consciente na escolha do sistema de TV digital para o Brasil.

No dia 29 de junho de 2006, o Presidente da República, Luís Inácio Lula da Silva publicou o Decreto N°5820 (PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA, 2006), dispondo sobre a implantação do SBTVD-T²⁷, estabelecendo diretrizes para a transição do sistema de transmissão analógico para o sistema de transmissão digital do serviço de radiodifusão de sons e imagens e do serviço de retransmissão de televisão, e dando outras providências.

A Figura 2.1 mostra a foto onde o Ministro das Comunicações, Hélio Costa, fala durante cerimônia de assinatura de decreto sobre a implantação do SBTVD e assinatura do termo do acordo tecnológico entre os governos do Brasil e Japão, no Palácio do Planalto, em Brasília, no dia 26 de junho de 2006.

No dia 10 de outubro de 2006, o Ministro das Comunicações, Hélio Costa, publicou a portaria N°652 (MINISTÉRIO DAS COMUNICAÇÕES, 2006), estabelecendo os critérios e prazos para a consignação do canal digital. A Figura 2.2 mostra o cronograma da digitalização dos canais de TV no Brasil conforme a portaria 652.

²⁶ FINEP: Financiadora de Estudos e Projetos.

²⁷ SBTVD-T: Sistema Brasileiro de TV Digital Terrestre.

Figura 2.1. Ministro das Comunicações Hélio Costa durante cerimônia de assinatura do Decreto sobre a implantação do SBTVD (Fonte: Revista da SET, Edição 87)

Figura 2.2. Cronograma da digitalização conforme a Portaria N°652

No dia 23 de novembro de 2006 foi instituído o Fórum do Sistema Brasileiro de TV Digital, como determinava o Decreto N°5820, tendo sido eleito como presidente o Engº Roberto Franco.

2.2 O Espectro Eletromagnético de Frequências

A propagação das ondas de rádio sofre influência de vários efeitos devidos a variação do índice de refração com a altura, à absorção pelos gases da atmosfera e à atenuação e espalhamento das ondas pela chuva e nevoeiro causados pela turbulência e reflexão nos seus vários níveis. Devido a estas características, as comunicações pelo ar só podem ocorrer em determinados comprimentos de ondas. Considerando que o comprimento de onda no espaço livre, ou ar, é dado por

$$\lambda(m) = \frac{3 \cdot 10^8 \left(\frac{m}{s}\right)}{f(Hz)} \quad (2.1)$$

Então estas comunicações estarão restritas às respectivas frequências destes comprimentos de onda. A Figura 2.3 mostra a absorção atmosférica relacionada a diferentes comprimentos de onda.

Figura 2.3. Absorção Atmosférica (WIKIMEDIA COMMONS)

A parte do espectro eletromagnético destinada às comunicações pelo ar é denominada **Espectro de Radiofrequência** e está compreendida entre as frequências de 3 KHz a 300 GHz.

O espectro de radiofrequências é controlado pela ITU, e normatizado pela **Recomendação ITU-R V.431-7** (INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION,

2000). A Figura 2.4 mostra uma representação destas faixas de freqüências e a Tabela 2.1 as nomenclaturas utilizadas para estas representações, incluindo alguns exemplos de aplicação.

Figura 2.4. Bandas de Freqüências ITU (Fonte: www.py6cj.qsl.br/.../image001.gif)

Tabela 2.1 – Nomenclatura ITU

Banda	Sigla	Banda ITU	Frequência	Exemplos de Utilização
Extremely Low Frequency	ELF	1	3 a 30 Hz	Comunicações com submarinos.
Super Low Frequency	SLF	2	30 a 300 Hz	Comunicações com submarinos.
Ultra Low Frequency	ULF	3	300 a 3.000 Hz	Comunicações dentro de minas.
Very Low Frequency	VLF	4	3 a 30 KHz	Comunicações submarinas, detectores de avalanches, monitores de batimentos cardíacos, geofísica.
Low Frequency	LF	5	30 a 300 KHz	Navegação, sinais de tempo, ondas longas radiodifusão AM.
Medium Frequency	MF	6	300 a 3.000 KHz	Radiodifusão ondas médias AM.
High Frequency	HF	7	3 a 30 MHz	Ondas curtas, rádio amadores, comunicações aeronáuticas além do horizonte.
Very High Frequency	VHF	8	30 a 300 MHz	Radiodifusão FM, TV, comunicações aeronáuticas torre-avião em visibilidade, comunicações aeronáuticas avião-avião.
Ultra High Frequency	UHF	9	300 a 3.000 MHz	Radiodifusão TV, fornos de microondas, telefones celulares, redes locais sem fio (LAN), <i>bluetooth</i> , GPS, <i>walkie-talkies</i> , telefones sem fio.
Super High Frequency	SHF	10	3 a 30 GHz	Dispositivos de microondas, redes locais sem fio (LAN), radares.
Extremely High Frequency	EHF	11	30 a 300 GHz	Radioastronomia, links de microondas.

(Fonte: ITU Radio Regulations, Volume 1, Article 2; Edition of 2004)

As frequências acima de 300 GHz não são utilizadas para comunicação através do ar, haja vista que os sinais transmitidos seriam completamente absorvidos pela atmosfera.

No Brasil o órgão responsável pelo espectro de rádios frequências é a Agência Nacional de Telecomunicações – ANATEL, que define o espectro de radiofrequências como um bem público, de fruição limitada, cujo uso é administrado pela Agência, e que corresponde a uma parte do espectro eletromagnético abaixo de 3.000 GHz, que se propaga no espaço sem guia artificial e que é do ponto de vista do conhecimento tecnológico atual, passível de uso por sistemas de radiocomunicação.

O uso simultâneo do espectro em uma mesma área, pela transmissão de vários sinais em uma mesma faixa de frequências, resulta em interferência, o que pode distorcer ou impossibilitar a recepção da informação transmitida. Este fato exigiu que fossem estabelecidos organismos encarregados de administrar este espectro, autorizando usuários a transmitir em uma determinada frequência e em uma dada região, em detrimento dos demais. O órgão mundial responsável por estas funções é a ITU, e nos países em particular, por órgãos reguladores nacionais, como por exemplo, a ANATEL no Brasil. Existem ainda órgãos regionais que participam deste processo como a Comissão Interamericana de Telecomunicações (CITEL)²⁸ nas Américas.

De um modo geral, quando as transmissões começam e terminam dentro das fronteiras do país elas são de responsabilidade do órgão nacional. Quando estas transmissões cruzam fronteiras de países ou envolvem o espaço exterior, como no caso de satélites, comunicação aeronáutica ou marítima, a responsabilidade passa a ser da ITU.

Assim, no Brasil as bandas destinadas para o uso em sistemas de radiodifusão são as Bandas 8 e 9, que compreendem as frequências de 30 a 3.000 MHz ou ainda, as Bandas de VHF e UHF. Nestas bandas a propagação é por ondas troposféricas e cobrem distâncias de até algumas centenas de quilômetros.

Para regulamentar o uso do espectro radioelétrico no Brasil, a ANATEL publica periodicamente o plano de **“Atribuições de Faixas de Frequências no Brasil”**. A Figura 2.5 mostra a parte deste plano destinado às faixas de VHF e UHF, com os destaques para as faixas de frequências dos canais de TV.

A Tabela 2.2 mostra as faixas de frequências destinadas ao serviço de radiodifusão de sons e imagens de acordo com as resoluções ANATEL.

²⁸ CITEL – Comissão Interamericana de Telecomunicações nas Américas.

Figura 2.5. Atribuições de Faixas de Frequências no Brasil – VHF e UHF (Fonte: Anatel 2007)

Tabela 2.2 – Faixas de frequências e canais destinadas ao serviço de radiodifusão de sons e imagens

Banda	Sigla	Banda ITU	Frequência	Canais
Very High Frequency	VHF	8	54 a 72 MHz	2 a 4
Very High Frequency	VHF	8	76 a 88 MHz	5 e 6
Very High Frequency	VHF	8	174 a 216 MHz	7 a 13
Ultra High Frequency	UHF	9	470 a 608MHz	14 a 36
Ultra High Frequency	UHF	9	614 a 806 MHz	38 a 69

(Fonte: ITU Radio Regulations, Volume 1, Article 2; Edition of 2004)

A largura de banda dos canais de TV adotada no Brasil é 6 MHz, **padrão M**, segundo a ITU e assim é possível calcular através da Tabela 2.2 que o número de canais disponíveis para TV no Brasil é de 12 canais em VHF e 55 canais em UHF, perfazendo um total de 67

canais ou 402 MHz. Estes canais são distribuídos pelo território nacional de acordo com regras estabelecidas pela ANATEL que levam em consideração a localização da estação geradora, altura da antena, sua potência, classe do serviço, área de cobertura, morfologia do terreno, e estações interferentes.

Figura 2.6. Canais analógicos de TV alocados no Brasil (Fonte: Anatel 2007)

Atualmente, segundo a ANATEL, estão alocados no “**Plano Básico de Distribuição de Canais Analógicos de TV**”, 10.157 canais, como mostra a Figura 2.6.

Segundo os dados do PNAD 2005, 48,4 milhões de domicílios residenciais do país recebem o sinal de TV através da transmissão terrestre (VHF e UHF), o que representa 91,2% do total de 53,1 milhões de domicílios residenciais do país, e tornando o Brasil o maior país do mundo em número de domicílios residenciais cobertos pela TV aberta terrestre.

2.3 A Propagação dos Sinais de TV

A energia irradiada a partir de uma antena transmissora chega até a antena receptora através de vários possíveis caminhos de propagação, como mostra a Figura 2.7.

Figura 2.7. Percursos da Propagação

Os sinais de VHF e UHF se propagam através das ondas espaciais que são compostas na sua maioria por **ondas diretas**, **ondas refletidas**, e **ondas troposféricas**. As ondas diretas se propagam na sua maioria, diretamente do transmissor para o receptor, as ondas refletidas chegam ao receptor após refletirem na superfície da Terra, ou em algum obstáculo existente, e as ondas troposféricas são refletidas e refratadas devido às bruscas alterações na constante dielétrica da baixa atmosfera (altitudes menores que 10 km) e podem se propagar além do horizonte. A energia também pode ser recebida além do horizonte, como resultado da difração em torno da superfície esférica da Terra ou em outros obstáculos. Somando-se aos vários caminhos do sinal e as variações espaciais, o modelo de propagação deve considerar as variações do sinal ao longo do tempo e os efeitos do desvanecimento (*fading*) (COLLINS, 2001).

2.4 Medidas de Campo do Sinal Analógico de TV

O Laboratório de TV Digital da Universidade Presbiteriana Mackenzie, realizou durante os anos 2004 e 2005 uma campanha de medidas de campo na região metropolitana de São Paulo com o objetivo de fazer o levantamento da qualidade do sinal de TV analógica em

diversos pontos de recepção dentro da área de cobertura. Para a realização desta campanha foi utilizada a unidade móvel de medidas mostrada na Figura 2.8.

Vista Interna da Unidade Móvel

Figura 2.8. Unidade móvel de medidas de campo

Figura 2.9. Clusters e torres de transmissão das redes de TV em São Paulo

Figura 2.11. Qualidade subjetiva da imagem ITU-R BT.500-11

A norma ITU-R BT.500-11 (INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, 2002) caracteriza o procedimento para a análise subjetiva da qualidade de vídeo através da comparação entre cinco tipos de imagens de referência, com diferentes graus de interferência, mostradas na Figura 2.11:

- a) Classificação 5: qualidade excelente, imagem sem interferências, representada pela imagem 5;
- b) Classificação 4: qualidade boa, imagem com interferência fraca, leve multipercurso (fantasma) e leve atenuação, representada pela imagem 4;
- c) Classificação 3: qualidade razoável: imagem com interferência moderada, múltiplos ecos (fantasmas), atenuação moderada (chuvisco), e ruído impulsivo, representada pela imagem 3;
- d) Classificação 2: qualidade pobre: imagem com interferência forte, múltiplos ecos (fantasmas), atenuação forte (chuvisco), representada pela imagem 2;
- e) Classificação 1: qualidade ruim: imagem com interferência muito forte, múltiplos ecos (fantasmas) acentuados, atenuação (chuvisco) muito forte, representada pela imagem 1;
- f) Classificação 0: sem imagem: o sinal não sensibiliza o receptor, representada pela imagem 0.

A campanha de campo produziu resultados em 144 pontos, sendo que em cada ponto foram coletadas as medidas de cada uma das emissoras. As figuras a seguir mostram os resultados de cada uma das emissoras.

Figura 2.12. Qualidade do sinal analógico da TV Cultura

SBT

Qualidade da Imagem

ITU-R BT 500-11

5 km

10 km

20 km

30 km

2004

Figura 2.13. Qualidade do sinal analógico do SBT

TV Globo

Qualidade da Imagem

ITU-R BT 500-11

5 km

10 km

20 km

30 km

2004

Figura 2.14. Qualidade do sinal analógico da TV Globo

Figura 2.15. Qualidade do sinal analógico da TV Record

Figura 2.16. Qualidade do sinal analógico da Rede TV

Figura 2.17. Qualidade do sinal analógico da TV Gazeta

Figura 2.18. Qualidade do sinal analógico da TV Bandeirantes

Figura 2.12 mostra os resultados da TV Cultura, canal 2; a Figura 2.13 mostra o resultado do SBT, canal 4; a Figura 2.14 mostra o resultado da TV Globo, canal 5; a Figura 2.15 mostra o resultado da TV Record, canal 7; a Figura 2.16 mostra o resultado da Rede TV, canal 9; a Figura 2.17 mostra o resultado da TV Gazeta, canal 11; e a Figura 2.18 mostra o resultado da TV Bandeirantes, canal 13.

Analisando os dados dos gráficos apresentados foi possível compor uma média da qualidade subjetiva da imagem na região metropolitana de São Paulo, cujos dados são apresentados na Tabela 2.3, sendo possível observar que **60,72%** dos pontos medidos apresentam uma qualidade subjetiva de imagem abaixo de razoável (menor do que 3). Também é possível observar que alguns destes pontos estão muito próximos as torres de transmissão, e com um nível de sinal bem elevado e suficiente para sensibilizar o receptor.

O motivo da qualidade da imagem não estar dentro dos limites classificados como “bom”, é que existem outros fatores que degradam a qualidade da imagem no receptor de TV além da atenuação no espaço livre e a obstrução do sinal. Estes outros fatores que devem ser considerados na análise da recepção do sinal incluem: a recepção dos sinais com multipercurso, o ruído impulsivo, a interferência entre canais adjacentes, e a interferência entre co-canais.

Tabela 2.3 – Resultado das medidas de campo quanto a qualidade subjetiva da imagem

Região Metropolitana de São Paulo				
Classificação ITU-R BT.500-11	Qualidade	Interferência	Nº de Pontos	% do Nº de Pontos
5	Excelente	Imperceptível	93	11,86%
4	Boa	Perceptível mas não incomoda	215	27,42%
3	Razoável	Perceptível mas incomoda pouco	160	20,41%
2	Pobre	Perceptível e Incomoda	165	21,05%
1	Ruim	Perceptível e incomoda muito	97	12,37%
0	Sem Imagem	Não sensibiliza o receptor	54	6,89%
Total de Pontos			784	100%

A partir da campanha de testes que foi realizada e dos resultados obtidos, pode-se caracterizar as imperfeições, ou interferências, que influenciam na recepção do sinal analógico, como:

- Desvanecimento (*Fading*) ou Chuviscos;
- Multipercurso (*Multipath*) ou Fantasmas;
- Ruído Impulsivo (*Impulse Noise*) (BEDICKS JUNIOR, et al., 2005);

- d) Interferência de Canal Adjacente;
- e) Interferência de Co-Canais;

2.5 Conclusão do Capítulo

Neste capítulo foi apresentada a importância do legado das transmissões analógicas e também a situação atual dos canais analógicos existentes. Uma contribuição inédita deste capítulo é a publicação dos resultados da cobertura do sinal analógico de cada uma das maiores emissoras da cidade de São Paulo. Estas informações são de grande importância para a comparação futura com a cobertura do sinal digital.

Com a transição para a transmissão digital, haverá a necessidade de uma convivência conjunta de ambos os sistemas. Sendo assim, é mais importante ainda conhecer os limites de cada um dos modos de transmissão de tal forma que as potências escolhidas sejam respeitadas e não prejudiquem o atual sistema de transmissão.

Os resultados da campanha de campo das medidas analógicas puderam mostrar que mesmo depois de quase sessenta anos de TV analógica no Brasil, ainda existem muitos problemas que impedem que o sinal seja recebido com qualidade, na maioria dos domicílios residenciais.

É importante observar também que muitos destes problemas aumentaram com o adensamento populacional das grandes regiões metropolitanas do país.

3 Estado da Arte em Transmissão de TV Digital Terrestre

O objetivo deste capítulo é apresentar o estado da arte dos sistemas de TV digital no mundo, as necessidades existentes para uma transmissão digital robusta, bem como as características específicas relacionadas a área de cobertura, potência irradiada e padrões estabelecidos para as operações no Brasil.

O interesse pelas tecnologias em digitalização da televisão vem crescendo ao longo dos últimos anos, capitaneado no mundo, por três principais sistemas de transmissão de TV digital terrestre. A modulação em oito níveis em banda lateral vestigial 8-VSB³⁰, desenvolvido pelo ATSC, nos Estados Unidos abriu o caminho para outros sistemas. O segundo, DVB-T, utiliza a tecnologia tradicional COFDM³¹, e foi adotado na Europa, Austrália, Cingapura e em algumas outras regiões do mundo. O terceiro, ISDB-T, utiliza a modulação BST-OFDM³², e foi adotado pelo Japão e mais recentemente pelo Brasil com algumas variantes. Na China, país que possui o maior mercado de televisores do mundo, e que grande parte de sua população recebe o sinal de TV através da transmissão terrestre, um grupo de trabalho recentemente desenvolveu um quarto sistema de TV digital, DMB-T³³, que atende suas necessidades específicas, inclusive com serviços multimídia.

A digitalização é uma grande revolução que está acontecendo em nossa sociedade, e mudará a forma de uso dos receptores de TV. Vive-se atualmente a era dos “pacotes digitais”; documentos, músicas, conversas telefônicas, imagens, tudo está sendo empacotado e enviado pelas redes de telecomunicações para que do outro lado seja desempacotado e entregue novamente ao usuário. Por que não também a televisão? Esta é a pergunta que os grandes operadores de TV por assinatura e os radiodifusores vem fazendo. O conceito da digitalização tem um grande impacto para a televisão e para a *internet*, a TV digital irá transformar o conceito de assistir TV em uma experiência de TV sob demanda. Para os provedores de serviços de *internet* significa um aumento da demanda de banda em dez, cem, ou até mil vezes devido aos novos serviços; e para os radiodifusores uma demanda por novos tipos de programas, com uma qualidade muito superior aos programas atuais e com novos formatos interativos (ROSE, 2004).

³⁰ 8-VSB: *Eight-level Vestigial Side-Band*.

³¹ COFDM: *Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing*.

³² BST-OFDM: *Band Segmented Transmission - Orthogonal Frequency Division Multiplexing*.

³³ DMB-T: *Digital Multimedia Broadcasting-Terrestrial*.

Dentre os benefícios existentes com a nova tecnologia digital nas transmissões de TV pode-se destacar:

- a) Uma melhor robustez do sinal transmitido;
- b) Uma melhor qualidade do som e da imagem;
- c) A possibilidade de imagens em alta definição e do som em múltiplos canais;
- d) A possibilidade de serviços encapsulados nas programações de TV, como, legendas, *closed caption*, guia eletrônico de programas (EPG³⁴), segundo canal de áudio ou segundo idioma (SAP³⁵), LIBRAS³⁶;
- e) A possibilidade de serviços interativos;
- f) A possibilidade do uso de um canal de retorno para interagir com os programas de TV ou mesmo para acessar informações na *internet*;
- g) A possibilidade de gravar os programas de TV em meio digital para assisti-los posteriormente;
- h) A possibilidade de utilizar a TV como um meio de acesso eletrônico para diversos tipos de serviço do tipo *e-gov*³⁷, *e-banking*³⁸, *e-commerce*³⁹, *e-learning*⁴⁰, etc.

Porém, nada disso será possível se o sinal que é transmitido da torre de TV não chegar até o receptor de TV. Muito além do que o desafio por novos serviços está diante de nós o desafio por uma transmissão de altíssima qualidade onde as interferências e imperfeições existentes no canal não poderão interromper o serviço, ao que se dá o nome de **robustez**. Se o sinal não for robusto não haverá imagem na tela do televisor, e sem a imagem não há audiência, e sem a audiência não há publicidade e sem a publicidade não há TV aberta.

3.1 Transmissão Analógica versus Transmissão Digital

Como foi possível observar no capítulo anterior, as interferências no sinal transmitido e as imperfeições do canal de RF, degradam o sinal analógico, mas, mesmo degradado e com muito desconforto ainda é possível assisti-lo até níveis bem baixos da qualidade subjetiva (classificação ITU 2, por exemplo). Porém, na transmissão digital não é assim, não existem

³⁴ EPG: Electronic Program Guide.

³⁵ SAP: Second Audio Program.

³⁶ LIBRAS: Linguagem Brasileira de Sinais.

³⁷ E-gov: Governo eletrônico.

³⁸ E-banking: Banco eletrônico.

³⁹ E-commerce: Comércio eletrônico.

⁴⁰ E-learning: Ensino eletrônico.

níveis para se classificar a qualidade da imagem, ou tem-se a imagem (com a qualidade máxima) ou não, e sendo assim, em locais onde o sinal analógico pode ser assistido com uma qualidade muito degradada, talvez não seja possível ter um sinal digital. A Figura 3.1 mostra uma comparação entre a transmissão de um sinal analógico e um sinal digital com relação à área de cobertura e a qualidade da imagem. Na figura é possível observar que quando o sinal analógico chega ao limite mínimo aceitável para uma boa qualidade de imagem (3), o sinal digital ainda continua funcionando (d). Porém, quando o sinal digital atinge o seu limite máximo de cobertura, ele cai abruptamente interrompendo o serviço.

Figura 3.1. Transmissão analógica versus digital (BEDICKS JUNIOR, 2000)

Esta característica de robustez é fundamental para a escolha do modelo de transmissão da TV digital terrestre, porque é ela que define a qualidade do serviço dentro da área de cobertura, ou seja, a quantidade de domicílios que receberão o sinal e conseqüentemente a audiência dos canais.

A transmissão de TV digital terrestre oferece vantagens e desvantagens se comparado com a transmissão analógica de TV, a característica da interrupção abrupta do sistema digital, comparado com a interrupção gradual, típica do sistema analógico, é uma desvantagem, significando uma maior atenção para garantir que um número maior de telespectadores receba o sinal satisfatoriamente. Na prática, isso significa que os limites da área de cobertura devem

ser definidos com um alto percentual de pontos de cobertura (número de domicílios que recebem o sinal dentro da área de cobertura), considerando o mínimo nível de sinal na entrada do receptor para a recepção e também a proteção contra interferências. Em contrapartida o sinal digital oferece uma qualidade igual em toda a área de cobertura e em alguns casos até ultrapassando a mesma, ou seja, tanto faz receber o sinal perto da torre de transmissão, como longe da torre, pois a qualidade será a mesma.

Considerando o interesse do conteúdo das transmissões de TV, em princípio, os sistemas digitais oferecem uma maior qualidade na recepção do que os sistemas analógicos para as mesmas condições de propagação, largura de banda e potência efetiva irradiada (ERP). Apesar disso, parte desta qualidade extra de recepção é cedida para se atingir uma maior capacidade de transmissão e uma maior flexibilidade de programas. Pode-se, por exemplo, transmitir um programa em HDTV, mais programas em SDTV, ou funcionalidades adicionais a cada programa individualmente, como mostra a Figura 3.2.

Figura 3.2. Flexibilidade do sistema de transmissão de TV digital

A flexibilidade permite uma escolha entre maior robustez e capacidade de transmissão permitindo assim diferentes tipos de serviços como a transmissão para dispositivos fixos com antenas externas até a transmissão para dispositivos móveis e portáteis com antenas internas, oferece também muitas vantagens, quando comparado com o “formato fixo” do sistema analógico, tais como: maior oferta de serviços, maior capacidade de programas no mesmo espectro alocado, melhor qualidade de recepção, menor potência de transmissão, e maior robustez do sinal transmitido e a possibilidade de recepção dos sinais com qualidade em dispositivos móveis e portáteis.

A robustez por sua vez está diretamente relacionada com a qualidade do sinal que chega até o receptor de TV, e para que isso ocorra é necessário que o sinal transmitido seja irradiado a partir da torre de transmissão com características suficientes para atravessar o canal de transmissão com suas imperfeições e interferências. Pode-se caracterizar o sistema de transmissão pela antena, transmissor e modulador (ou excitador como muitas vezes é chamado) como mostra a Figura 3.3.

Figura 3.3. Sistema de transmissão

A antena é responsável por irradiar o sinal no ar, proveniente do transmissor, que por sua vez tem a função de amplificar o sinal proveniente do modulador. O transmissor pode ser chamado também de amplificador de alta potência (HPA – *High Power Amplifier*), uma vez que na saída do modulador já existe um sinal modulado de RF de baixa potência, por isso, muitas vezes o modulador é chamado de excitador. Assim em uma linguagem mais atual, pode-se compor a cadeia de transmissão como: Excitador, HPA e a Antena.

Apesar da antena e do HPA terem um papel importante na potência irradiada do sinal, área de cobertura e interferências, não são eles que caracterizam o sistema do ponto de vista da normatização, o qual segundo a ITU deve ser caracterizado pelo seu padrão de modulação. Assim, os sistemas, diferem-se entre si pelo modelo de modulação adotado.

É importante observar também que diferentes tipos de modulação produzem diferentes tipos de robustez, e isto se deve ao fato de como o tipo de modulação trata as questões de ocupação do canal, códigos de proteção de erros, relação C/N, etc. Estas técnicas que foram desenvolvidas ao longo dos anos permitiram que os sistemas de transmissão se tornassem mais robustos sem a necessidade de aumento de potência e em muitos casos até com a redução da potência.

As pesquisas, testes de laboratório e testes de campo que foram conduzidos pelo laboratório de TV digital do Mackenzie entre os anos de 1998 a 2005, tiveram por objetivo principal avaliar a robustez dos sistemas ATSC, DVB-T e ISDB-T.

3.2 O Sistema Norte-Americano ATSC

É o sistema desenvolvido pelos Estados Unidos e atualmente adotado nos Estados Unidos, Canadá, México e Coreia do Sul. A modulação adotada para o sistema é 8VSB, utilizando dois corretores de erro, um do tipo Reed Solomon e outro do tipo convolucional com “*code rate*” igual a 2/3. A taxa de bits na entrada do modulador é fixa em 19,39Mbps, o que satisfaz plenamente a transmissão de TV de alta definição (HDTV). Comparado com os outros sistemas, para essa taxa de bits, o sistema ATSC é o que apresenta o melhor resultado de relação C/N ($\approx 15\text{dB}$) o que garante uma melhor recepção a longas distâncias. No que diz respeito à interferência por ruído impulsivo, mesmo para as drásticas condições de recepção existentes no Brasil, o desempenho do sistema ATSC é satisfatório. A maior deficiência do sistema ATSC é o fato de que a modulação 8VSB não possui uma proteção natural contra a interferência por multipercursos (eco). As novas gerações de circuitos integrados

demoduladores que estão surgindo estão incluindo circuitos equalizadores que pretendem minimizar estes problemas. Assim, diante deste aspecto, o próprio ATSC classifica os receptores do sistema em 4 categorias:

- a. Receptores produzidos antes de 1998 (**Primeira Geração**): Suportavam ecos com níveis até 10dB abaixo do sinal principal com deslocamentos entre $-5\mu\text{s}$ (pré-eco) e $+18\mu\text{s}$ (pós-eco). Para níveis da ordem de 6dB esses receptores não funcionavam;
- b. Receptores produzidos entre 1998 e 1999 (**Segunda Geração**): Suportavam ecos com níveis até 10dB abaixo do sinal principal com deslocamentos entre $-2\mu\text{s}$ e $+20\mu\text{s}$. Para níveis da ordem de 6dB, suportavam ecos entre $-1\mu\text{s}$ e $+20\mu\text{s}$;
- c. Receptores produzidos entre 2000 e 2003 (**Terceira Geração**): Suportavam ecos com níveis até 10 dB abaixo do sinal principal com deslocamento entre $-5\mu\text{s}$ e $+40\mu\text{s}$. Para níveis da ordem de 6dB suportavam ecos entre $-2\mu\text{s}$ e $40\mu\text{s}$;
- d. Receptores produzidos a partir de 2004 (**Quarta Geração**): Suportam ecos com níveis de até 10dB abaixo do sinal principal com deslocamento entre $-50\mu\text{s}$ e $+50\mu\text{s}$. Para níveis da ordem de 6dB suportam ecos entre $-30\mu\text{s}$ e $+45\mu\text{s}$.

Pode-se observar que o desempenho dos receptores ATSC, com modulação 8VSB, no que diz respeito à distorção por multicaminhos melhorou muito entre 1998 e 2004. Mas, mesmo assim, testes de laboratório realizados em 2004 pelo Mackenzie, com receptores da última geração do sistema ATSC existentes no mercado, mostram que eles ainda deixam a desejar quando se compara o seu desempenho para distorção por multipercurso com o comportamento da proteção natural contra esse tipo de distorção existente na modulação OFDM.

A modulação 8VSB também possui muito baixa imunidade ao efeito *Doppler* o que impede a utilização dos receptores ATSC em veículos em movimento (TV móvel).

Segundo informações do ATSC, está em fase de implantação, no sistema, o padrão A-VSB (Advanced VSB), que é a introdução de um feixe adicional mais robusto, totalmente compatível com os receptores 8VSB já existentes. As principais características do padrão A-VSB são:

- a. Utilização de 8 símbolos, como na modulação 8VSB;
- b. Características espectrais idênticas à do 8VSB;
- c. Estrutura de quadro é idêntica à do 8VSB;
- d. Não ocorrerá nenhum impacto na capacidade de correção de erro no legado já existente, haja vista que os receptores do sistema ATSC no padrão 8VSB simplesmente descartarão os pacotes de informação A-VSB;
- e. Os novos receptores (com função adicional) reconhecerão os pacotes A-VSB e desta forma decodificarão os dados do A-VSB;
- f. Será possível uma mixagem automática com o padrão atualmente existente (8VSB) tal que, por exemplo com um corretor de erro convolucional de 1/2, existirá um grande número de níveis de robustez conforme a taxa de bits for sendo reduzida de 19,39Mbps para a metade;
- g. A redução da taxa de bits do feixe A-VSB se refletirá substancialmente em uma melhoria do comportamento dos novos receptores em relação ao ruído branco e a distorção por multipercurso. Informações divulgadas pelo ATSC mostram que na recepção do feixe do A-VSB é possível uma redução de até 6dB na relação C/N e um ganho de até 1 dB na proteção contra ecos;
- h. Outra melhoria informada mostra que para um eco com atraso de 15 μ s e nível de 5dB, os novos receptores híbridos (8VSB+A-VSB) suportarão um desvio de frequência por efeito *Doppler* equivalente a 46Hz no feixe 8VSB e de 56Hz no feixe A-VSB o que representa aproximadamente uma velocidade de 70 km/h no canal 59 UHF.
- i. Existe também a proposta de que com a introdução do feixe A-VSB os novos receptores no sistema ATSC terão uma transmissão hierárquica semelhante aos modos já existentes na modulação OFDM, podendo por exemplo, receber TV de alta definição (HDTV) no modo normal (8VSB) e TV com definição normal (SDTV) com modo mais robusto (A-VSB), simultaneamente.

3.3 O Sistema Europeu DVB-T

É o sistema desenvolvido pelo Fórum DVB, na Europa e adotado atualmente na Europa e em mais alguns países da Ásia e África. O padrão de modulação utilizado pelo sistema europeu DVB-T de televisão digital terrestre é o COFDM de portadoras múltiplas e com intervalo de guarda (FISHER, 2004). Na sua concepção original não havia sido projetado

para uso em dispositivos móveis, mas já contemplava a modulação hierárquica que permitia a convivência simultânea, num mesmo fluxo de bits, de duas transmissões com diferentes graus de robustez à interferências. Através de um processo de mapeamento de bits pode-se optar por uma transmissão com modulação das subportadoras em 16QAM⁴¹ e outra em QPSK⁴² ou as duas em QPSK. Pode-se também escolher diferentes taxas de código para os corretores de erros convolucionais (FEC⁴³) o que permitiu a transmissão simultânea de um canal em alta definição para recepção fixa com modulação 16QAM e de um canal em baixa definição com modulação QPSK. Diante desta possibilidade de atender dispositivos móveis e portáteis, o DVB publicou em Junho de 2004 um documento intitulado “*Transmission System for Handheld Terminals (DVB-H)*” onde são estabelecidos os padrões de transmissão de serviços multimídia.

As principais características do DVB-H são:

- a. Economia de bateria: para os equipamentos portáteis a economia de energia fornecida pelas baterias é um item de grande importância. Um dos mecanismos responsáveis por esta economia foi a utilização do protocolo de rede de pacotes IP na interface com os terminais DVB-H.
- b. Utilização de um FEC adicional na camada de enlace, chamado “*Multiprotocol Encapsulated Data – MPE-FEC*” como objetivo de melhorar a relação C/N, a robustez ao efeito *Doppler* e ruído impulsivo;
- c. A sinalização para o DVB-H é realizada através dos bits TPS⁴⁴ da estrutura de quadro do DVB-T. Isto é feito para garantir uma robusta e rápida identificação dos dados de sinalização do DVB-H, como o de identificação da célula e da frequência do “*handover*” nas operações móveis;
- d. Implantação do modo 4K que permitirá uma boa robustez à distorção de multipercurso associado a uma boa robustez ao efeito Doppler, essencial para aplicações móveis;
- e. A utilização de um embaralhador de símbolos mais eficiente para os modos 2K e 4K, permitindo uma maior robustez a ruído impulsivo;
- f. Transparência com o legado dos receptores fixos DVB-T;

⁴¹ 16QAM: 16 Quadrature Amplitude Modulation.

⁴² QPSK: Quadrature Phase Shift Keying.

⁴³ FEC: Forward Error Correction.

⁴⁴ TPS: Transmission Parameter Signaling.

- g. Possibilidade de uso da plataforma MHP⁴⁵ como *middleware*, oferecendo ao usuário aplicações interativas, como e-mail, acesso a internet, serviços de informação, guia eletrônico de programas, jogos, etc.

3.4 O Sistema Japonês ISDB-T

O ISDB-T foi desenvolvido no Japão e adotado pelo Japão e pelo Brasil (que adotou⁴⁶ a parte de transmissão do sistema). O método de modulação do sistema ISDB-T, BST-OFDM (*Band Segmented Transmission – OFDM*), difere significativamente do método monoportadora utilizado no sistema ATSC (8VSB) porém, muito semelhante ao método multiportadora utilizado no DVB-T. As diferenças básicas estão na segmentação da banda do canal em treze segmentos distintos e na inserção do entrelaçamento temporal (*time interleaving*).

De forma análoga ao COFDM, a modulação BST-OFDM utiliza múltiplas portadoras e pode ser programada de acordo com a robustez desejada para DQPSK⁴⁷, QPSK, 16QAM ou 64QAM⁴⁸. É importante observar que quanto mais robusta for a modulação empregada, menor será a taxa de bits disponível para utilização. São determinados três modos de operação: Modo 1, ou 2K com 1.404 portadoras simultâneas separadas por $f_x=3,968$ kHz; Modo 2, ou 4K, com 2.808 portadoras separadas por $f_x=1,984$ kHz e Modo 3, ou 8K, com 5.616 portadoras separadas por $f_x=0,99206$ kHz. O tempo útil de cada bloco, também conhecido como “Símbolo” é determinado por $T_u=1/f_x$, e desta forma tem-se: Modo 1, $T_u=252\mu s$; Modo 2, $T_u=504\mu s$; e Modo 3, $T_u=1.008\mu s$. O FEC pode ser programado para 1/2, 2/3, 3/4, 5/6 ou 7/8 de acordo com a robustez desejada.

Na modulação BST-OFDM, do mesmo modo como no sistema DVB-T, após cada símbolo é deixado um intervalo de tempo sem nenhuma informação útil, conhecido como “intervalo de guarda” e que tem a duração de $\Delta t=k.T_u$, onde o fator k pode ser programado para 1/4, 1/8, 1/16 ou 1/32. A introdução do “intervalo de guarda” dá ao sistema ISDB-T uma proteção natural contra interferências por multipercursos. A Figura 3.4 mostra um exemplo de uma transmissão no modo 8K, com $k=1/32$, e que, além do sinal principal, esteja chegando ao receptor um sinal com atraso de $20\mu s$. Como $\Delta t=k.T_u=(1/32)\times 1.008\mu s=31,5\mu s$, conclui-se que o sinal atrasado não irá invadir o símbolo seguinte e desta forma não causará interferência.

⁴⁵ MHP: *Multimedia Home Platform*.

⁴⁶ A canalização VHF e UHF são diferentes no Brasil e Japão, e também a frequência de FI. O Brasil manteve a canalização e FI (44 MHz) brasileiras.

⁴⁷ DQPSK: *Differential Quadrature Phase Shift Keying*.

⁴⁸ 64QAM: *64 Quadrature Amplitude Modulation*.

Outra vantagem da utilização do intervalo de guarda é o aumento da imunidade ao “efeito *doppler*”⁴⁹ e a possibilidade do uso desta modulação em sistemas que transmitam sinais para dispositivos móveis e portáteis.

Figura 3.4. Transmissão no Modo 8K com intervalo de guarda.

Uma inovação introduzida pelo sistema ISDB-T foi a segmentação de banda, ou seja, o canal de TV de 6MHz é dividido em 14 segmentos de 428,571 kHz, dos quais 13 são utilizados (5.571.428,571 Hz) e o restante (428.571 Hz) dividido em dois para funcionar como uma banda de guarda antes e depois das portadoras OFDM, como mostra a Figura 3.5.

Figura 3.5. Segmentação do canal de 6 MHz

Nesses 13 segmentos existe a possibilidade de transmissão de até três programas com robustez e modulações diferentes. A Figura 3.6 mostra o uso da banda segmentada em uma transmissão hierárquica com um programa em HDTV, um programa em SDTV e um programa em 1Seg⁵⁰.

⁴⁹ Efeito *doppler*: reflexão do sinal provocada por objetos em movimento (eco).

⁵⁰ 1Seg: *One Segment*. Transmissão que utiliza um único segmento da modulação BST-OFDM, destinada a dispositivos portáteis.

Figura 3.6 Exemplo de transmissão hierárquica com a banda segmentada.

O programa HDTV utiliza modulação 64QAM, o programa SDTV, 16QAM e o programa 1Seg, QPSK. Os três estão sendo transmitidos em um único canal de 6 MHz. Esta possibilidade cria uma grande flexibilidade ao sistema ISDB-T, podendo existir diferentes configurações para diferentes tipos de serviço e diferentes tipos de modelo de negócios.

Uma outra inovação introduzida pela modulação BST-OFDM é o embaralhamento temporal⁵¹, programável até 427,5ms que melhora significativamente a eficiência da recepção na presença de interferências concentradas, como o ruído impulsivo.

A relação C/N ⁵² da modulação BST-OFDM é um ponto fraco do sistema quando comparada isoladamente com a mesma taxa de bits do ATSC que tem um desempenho 4 dB melhor⁵³.

3.5 O Sistema Chinês DMB-T

Em 2001, a China fez uma chamada por propostas para um sistema de TV digital terrestre. Dentre as cinco propostas que recebeu estavam o ADTB-T⁵⁴, um sistema de portadora única submetido pelo HDTV TEEG; e o DMB-T⁵⁵, um sistema multiportadora submetido pela Universidade de Tsinghua. Em 2003 a Academia de Ciência e Radiodifusão Chinesa

⁵¹ Embaralhamento temporal: *time interleaving*.

⁵² C/N : *Carrier to Noise ratio*. Relação portadora ruído.

⁵³ O desempenho 4 dB melhor no C/N do sistema ATSC permite uma menor potência de transmissão para cobrir uma mesma área, quando comparado com o ISDB-T.

⁵⁴ ADTB-T: *Advanced Digital Television Broadcasting-Terrestrial*.

⁵⁵ DMB-T: *Digital Multimedia Broadcasting-Terrestrial*.

encaminhou uma nova proposta de um sistema com multiportadoras chamado TiMi – *Terrestrial Interactive Multiservice Infrastructure*. Depois dos testes de laboratório, testes de campo e análise das propriedades intelectuais, a Academia Chinesa de Engenharia conduziu um grupo de trabalho fundindo as três propostas e finalmente em agosto de 2006, o grupo estabeleceu o marco da TV digital chinesa com a publicação do conjunto de padrões “*Frame Structure, Channel Coding and Modulation for a Digital Television Terrestrial Broadcasting System*”. O sistema utiliza as técnicas de monoportadora e multiportadoras, suporta serviços de radiodifusão com multiprogramação em SDTV⁵⁶ e HDTV⁵⁷.

A Figura 3.7 mostra o cronograma para a implantação do sistema chinês de TV digital. Basicamente o sistema terá fases: a primeira, que constará de testes comerciais nas cidades de Beijing, Shanghai, Tianjin, Shenyang, Qingdao e Qinhuangdao, e durante os Jogos Olímpicos de 2008 serão montadas estações de transmissão em HDTV; a segunda, onde as cidades farão a transição dos serviços de radiodifusão de analógico para digital entre os anos de 2010 a 2015; e finalmente a terceira, por volta de 2015, quando haverá o desligamento (*switch-off*) definitivo do sistema analógico.

Figura 3.7. Cronograma para a implantação do sistema chinês de TV digital (LIANG, et al., 2007)

A Figura 3.8 mostra o diagrama de blocos do sistema de transmissão chinês para TV digital, onde o sinal é transmitido em quadros. Cada quadro contém um cabeçalho (*Frame Header – FH*) e um bloco de dados (*Frame Body – FB*). O bloco de dados contém a informação do sistema (*System Information – SI*) e os dados codificados. Tanto o FH, quanto o FB tem a mesma taxa de símbolos, 7,56 Msps. No corretor de erros FEC⁵⁸ está incluso o codificador LDPC⁵⁹ com três diferentes taxas: LDPC (7.493, 3.048), LDPC (7.493, 4.572), e LDPC (7.493, 6.096). O codificador Bose, Ray-Chaudhuri e Hocquenghem (BCH) (762, 752) é concatenado fora do LDPC. Também faz parte do codificador LDPC um entrelaçador de

⁵⁶ SDTV: *Standard Definition Television*.

⁵⁷ HDTV: *High Definition Television*.

⁵⁸ FEC: *Forward Error Correction*.

⁵⁹ LDPC: *Low-Density Parity-Check*.

símbolos com duas diferentes configurações: M 240 e M 720. Para limitar a largura de banda em 8 MHz, é utilizado um filtro SRRC⁶⁰.

Figura 3.8. Diagrama de blocos do sistema de transmissão chinês para TV digital (LIANG et al., 2007)

A opção da modulação com multiportadoras não utiliza subportadoras nem pilotos, o FH modulado por uma monoportadora, substitui o prefixo cíclico (GI⁶¹), sendo então a única diferença entre os modos monoportadora e multiportadora a IFFT⁶² dos 3.780 pontos que pode ser protegidos por um filtro de dados para o FB. Cada modo tem dois tipos de estimação de canal e métodos de compensação.

As inovações tecnológicas do sistema de transmissão chinês para TV digital são:

- a. A utilização de seqüências pseudoaleatórias (PN⁶³) no domínio do tempo como cabeçalhos, pode ser utilizada como seqüência de treinamento para os equalizadores e também como intervalo de guarda para reduzir a interferência intersimbólica e atingir um grau elevado de eficiência espectral;
- b. A utilização da codificação LDPC como parte do FEC aumenta a eficiência do corretor de erro, melhorando a sensibilidade e resultando em uma maior área de cobertura com a mesma potência irradiada.
- c. A inclusão da técnica de espalhamento espectral, protege o sistema de informação e torna possível ao receptor identificar o modo correto de operação dentre os diversos tipos de distorções provocadas pelas imperfeições do canal.

A introdução da TV digital terrestre na China não tem apenas a meta de aprimorar a qualidade dos serviços existentes atualmente, mas abrir o caminho para novas aplicações. Com o sistema de TV digital terrestre é possível a transmissão de programas em HDTV e SDTV, programas para dispositivos móveis e portáteis, e aplicações de transmissão de dados

⁶⁰ SRRC: *Square-Root Raised Cosine*.

⁶¹ GI: *Guard Interval*.

⁶² IFFT: *Inverse Fast Fourier Transform*.

⁶³ PN: *Pseudonoise Sequencies*.

em alta velocidade. Atualmente na China a maioria dos lares recebe o sinal de TV através da transmissão terrestre aberta, ou seja, das 349 milhões de famílias chinesas com TV em casa, 67,3%, ou seja, 235 milhões assistem aos programas de TV através da recepção via ar (VHF e UHF). Estes telespectadores estão espalhados pelo território chinês nas áreas urbanas e rurais, e principalmente em áreas distantes onde os serviços de TV a cabo não são oferecidos, por ter um custo muito elevado a instalação dos cabos até estas regiões. A maioria destes lares recebe entre dois a cinco canais de TVs públicas. Com o sistema de TV digital adotado na China será possível transmitir entre 20 a 26 Mbps em um canal de TV de 8 MHz de largura de banda, aumentar a eficiência do sinal na área de cobertura e atingir lares aonde não era possível a recepção do sinal analógico. Esse é o resultado de uma recepção robusta tanto para ambientes com antena externa como para ambientes com antena interna, a rejeição a interferência de co-canais e canais adjacentes e também a possibilidade do uso das redes de frequência única (LIANG, et al., 2007).

3.6 O Relatório Final dos Testes de TV Digital

Após três anos de pesquisas, testes de laboratório e testes de campo (BEDICKS JUNIOR, et al., 2006) o grupo composto pelo Mackenzie, SET e ABERT, apresentou o “Relatório Final” (LABORATÓRIO DE TV DIGITAL MACKENZIE, 2000) a ANATEL que fez sua publicação em novembro de 2001. O texto a seguir é a conclusão do “Relatório Final”.

Capítulo VI – Conclusões

Considerando:

- Que a modulação COFDM apresenta melhor desempenho em situações de multipercurso intenso verificadas em áreas densamente povoadas;
- Que a modulação COFDM permite a implementação de modelo de transmissão em alta definição com adequada robustez;
- Que há soluções na modulação COFDM que superam a modulação 8VSB na imunidade a ruído impulsivo;
- Que somente a modulação COFDM permitiu a recepção em 100% dos pontos dentro do raio de 10 km. Este raio foi função da potência ERP utilizada. Potências ERP maiores corresponderão a maiores raios de cobertura com 100% de recepção;
- Que os resultados dos testes de laboratório sugerem que somente a modulação COFDM possibilita a recepção em áreas não atendidas por nenhum sistema, mediante o emprego de redes de frequência única;

- Que a vantagem de 4dB na relação sinal ruído da modulação 8VSB não se traduziu em resultados práticos de melhoria da cobertura;
- Que os resultados desfavoráveis da relação entre a potência de pico e a potência média têm baixa relevância, pois oneram apenas o concessionário e não a população;
- Que a desvantagem observada na modulação COFDM para a relação de proteção para canais adjacentes pode ser eliminada pela introdução de filtros com melhores características de rejeição nos receptores;
- Que todos os resultados de interferência co-canal não influenciam o planejamento para nenhuma das modulações testadas;
- Que nas situações em que os pontos de reflexão do sinal estão se movendo, a modulação COFDM apresenta melhor desempenho, possibilitando, inclusive, recepção móvel;
- Que os receptores de modulação 8VSB desenvolvidos no segundo semestre de 1999 e disponibilizados para os testes, até a presente data, apesar do emprego de técnicas de equalização sofisticadas, não apontaram para melhorias reais em situações práticas;
- Que a modulação COFDM apresenta flexibilidade na solução de problemas de cobertura;
- O objetivo de otimizar a recepção, replicando ou melhorando a cobertura atual dos sistemas de radiodifusão analógica;
- Que é imprescindível o emprego de modulação que maximize a recepção pelo ar de forma gratuita;

Concluimos que a modulação COFDM, além de tecnicamente superior é mais adequada às condições brasileiras que a modulação 8VSB, e, portanto, propomos à ANATEL que estabeleça que o sistema de TV digital a ser selecionado para adoção no Brasil deverá utilizar a modulação COFDM.

Podemos observar que as desvantagens apresentadas pelos sistemas com modulação COFDM são contornáveis, mesmo implicando em custos adicionais para os radiodifusores. Porém, as desvantagens apresentadas pelo sistema com modulação 8VSB retratam algumas limitações inerentes à própria modulação. O ônus das deficiências da modulação 8VSB recai todo sobre o público telespectador, que necessita sistemas de recepção – receptor e antena – mais sofisticados, na proporção da dificuldade que sua localização acarretar. Por outro lado, o ônus das dificuldades da modulação COFDM, todas contornáveis, recai somente sobre o radiodifusor que, em certas situações, deverá implementar sistemas de transmissão mais potentes ou mais sofisticados.

Dentre os possíveis sistemas que empregarem modulação COFDM, acreditamos que ainda é necessária a realização de testes adicionais e complementares além da

consideração de aspectos de mercado, tais como a avaliação do impacto que a adoção de um dos sistemas disponíveis terá sobre a indústria nacional e do “timing” de disponibilidade comercial de cada sistema, para a decisão final sobre o padrão a ser selecionado.

Assim, utilizaremos o período adicional concedido pela ANATEL, que se estenderá até o final do mês de abril, para desenvolvermos as atividades, as experiências e os estudos necessários para chegarmos a um posicionamento final sobre qual o sistema de TV Digital consideramos mais adequado para ser adotado no Brasil.

Nos anos seguintes a ANATEL desempenhou um papel muito importante na preparação da canalização para a transmissão digital e principalmente para a fase de transição. A partir dos resultados obtidos e apresentados no relatório final, a ANATEL constituiu um grupo de trabalho para cuidar das questões relacionadas a alocação dos canais. Este grupo passou a ser conhecido como “Grupo de Canalização” e contava com a participação de representantes da ANATEL, representantes das emissoras de TV, representantes de entidades afins e consultores e realizava reuniões periódicas para tratar do assunto. O objetivo do trabalho do grupo era preparar o espectro destinado aos canais de TV para os canais digitais, independentemente do sistema a ser escolhido, haja vista que a decisão ainda não havia sido tomada. Foram vários anos de trabalho até que em 29 de junho de 2006 o governo brasileiro apresentou a decisão tomada pelo Sistema Brasileiro de TV Digital.

O trabalho deste grupo ainda está em andamento porque a digitalização apenas começou e há a necessidade de se construir o plano dos canais digitais para todo o país. Como parte dos resultados deste grupo a ANATEL publicou em 07 de abril de 2005 o novo “Regulamento Técnico para a Prestação de Serviços de Radiodifusão de Sons e Imagens e de Retransmissão de Televisão” alterado pela “Resolução N°398” (ANATEL, 2005), onde consta no Anexo VII, desta resolução os “Critérios Técnicos para Estudos Envolvendo Canais Digitais”.

3.7 Critérios Técnicos para a Canalização da TV Digital no Brasil

Com o objetivo de evitar a interferência entre canais, sejam analógicos ou digitais, a ANATEL em conjunto com o grupo de canalização e o Módulo Técnico do SBTVD estabeleceu alguns critérios importantes para serem adotados quando estabelecidas as novas estações de transmissões digitais.

3.7.1 A Canalização para a TV Digital no Brasil

Podem ser viabilizados canais de 6 MHz na banda de VHF e na banda de UHF, porém com uma pequena diferença com relação a canalização analógica, que é o deslocamento da frequência central do canal, que deixa de ser o centro do canal e passa a ser o centro das portadoras OFDM. Com o objetivo de se promover uma maior proteção para o canal digital em relação aos analógicos adjacentes foi incluído um deslocamento de $1/7$ MHz na frequência central do canal, conforme mostra a Figura 3.9.

Figura 3.9. Deslocamento de frequência do canal digital

O principal motivo do deslocamento da frequência central foi reduzir a influência do pico da portadora de áudio do canal adjacente inferior (N-1) nas primeiras portadoras OFDM do canal digital (N). Assim, incluiu-se uma proteção adicional e a distância total entre o limite inferior do canal digital e o início das portadoras OFDM ficou em 364 KHz e com relação ao limite superior do canal digital e o final das portadoras OFDM ficou em 64 KHz. Com o uso desta técnica, houve um ganho de aproximadamente 2 dB no nível de potência máxima do canal digital. No futuro quando todos os canais forem digitais, a distância entre o início e o

fim das portadoras OFDM dos canais será exatamente um segmento, ou 1/14 de 6 MHz. A Tabela 3.1 mostra a canalização digital.

Tabela 3.1 - Canalização digital

Canal	Frequência Inicial e Final do Canal MHz	Frequência Central das Portadoras OFDM em 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	513,142857
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	573,142857
32	578 – 584	581,142857
33	584 – 590	587,142857
34	590 – 596	593,142857
35	596 – 602	599,142857
36	602 – 608	603,142857
37	608 – 614	Não utilizado para TV. Utilizado 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 - 660	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)

3.7.2 Máscara do Espectro de Transmissão para a TV Digital

O sinal de RF irradiado pela torre de TV ocupa a banda destinada ao canal alocado, no caso dos canais digitais, como já foi mostrado anteriormente, tem 5,7 MHz de largura de banda. Devido as características reais dos sistemas de transmissão, pequena parte da energia acaba ultrapassando os limites do canal, e pode interferir nos canais adjacentes. Com o objetivo de reduzir ao máximo este grau de interferência foram adotados três tipos de

máscaras de transmissão que deverão ser utilizados de acordo com os critérios de localização do canal e potência de transmissão. O nível do espectro, fora da banda, alocado para a transmissão do sinal de televisão, deve obrigatoriamente ser reduzido, aplicando-se uma filtragem adequada. A Figura 3.10 e a Tabela 3.2 indicam as atenuações mínimas das emissões fora da faixa em relação à potência média do transmissor, especificadas em função do afastamento em relação à frequência central das portadoras OFDM do sinal digital, para as máscaras não crítica, sub-crítica e crítica.

Figura 3.10. Máscara de transmissão (ABNT, 2007).

Tabela 3.2 - Especificação das máscaras do espectro de transmissão

Distância em relação ao centro das portadoras OFDM	Atenuação mínima em relação à potência média, medida no centro das portadoras OFDM		
	Máscara não crítica	Máscara sub-crítica	Máscara crítica
-15,00 MHz	83,0 dB	90,0 dB	97,0 dB
-9,00 MHz	83,0 dB	90,0 dB	97,0 dB
-4,50 MHz	53,0 dB	60,0 dB	67,0 dB
-3,15 MHz	36,0 dB	43,0 dB	50,0 dB
-3,00 MHz	27,0 dB	34,0 dB	34,0 dB
-2,86 MHz	20,0 dB	20,0 dB	20,0 dB

-2,79 MHz	0,0 dB	0,0 dB	0,0 dB
+2,79 MHz	0,0 dB	0,0 dB	0,0 dB
+2,86 MHz	20,0 dB	20,0 dB	20,0 dB
+3,00 MHz	27,0 dB	34,0 dB	34,0 dB
+3,15 MHz	36,0 dB	43,0 dB	50,0 dB
+4,50 MHz	53,0 dB	60,0 dB	67,0 dB
+9,00 MHz	83,0 dB	90,0 dB	97,0 dB
+15,00 MHz	83,0 dB	90,0 dB	97,0 dB

Fonte: NBR 15.601 (ABNT, 2007)

3.7.3 Classificação das Estações de Transmissão Digital

As estações digitais são classificadas em Classe Especial, Classe A, Classe B, e Classe C. A Tabela 3.3 indica os valores máximos de potência ERP⁶⁴ para cada classe de estação, a altura de referência adotada e as respectivas distâncias máximas ao contorno protegido, para a faixa de VHF e UHF.

Tabela 3.3 - Potência ERP para as classes de transmissão e distâncias ao contorno protegido

Classe	Canais	Máxima Potência ERP	Altura de referência acima do nível médio da radial (m)	Distância máxima ao contorno protegido (km)
VHF				
Especial	VHF	16 kW (12 dBk)	150	65
A		1,6 kW (2 dBk)		48
B		0,16 kW (-8 dBk)		32
C		0,016 kW (-18 dBk)		20
Classe	Canais	Máxima Potência ERP	Altura de referência acima do nível médio da radial (m)	Distância máxima ao contorno protegido (km)
UHF				
Especial	UHF 14 a 25	70kW (18,5 dBk)	150	57
	UHF 26 a 46	80 kW (19 dBk)		
	UHF 47 a 69	100 kW (20 dBk)		
A	UHF 14 a 69	8 kW (9 dBk)		42
B	UHF 14 a 69	0,8 kW (-1 dBk)		29
C	UHF 14 a 69	0,08 kW (-11 dBk)		18

Fonte: Anatel, Resolução N°398 (ANATEL, 2005).

⁶⁴ ERP: *Effective Radiated Power*.

3.7.4 Contorno Protegido

Todo canal digital é protegido contra interferências prejudiciais dentro da área delimitada pelo seu contorno protegido, que é o lugar geométrico dos pontos onde o valor de intensidade de campo é aquele tomado como referência de sinal desejado e para o qual é assegurada a relação mínima sinal desejado / sinal interferente (D/U^{65}) estipulado para o serviço. Para fins de planejamento, devem ser considerados que os pontos dentro do contorno protegido dos canais digitais devem ter intensidade de campo excedida em 50% dos locais em 90% do tempo. A Tabela 3.4 mostra o valor da intensidade de campo no limite do contorno protegido.

Tabela 3.4 - Intensidade de campo no limite do contorno protegido

Banda de Frequência	VHF	UHF
Intensidade de Campo dB μ V/m	43	51

Fonte: Anatel, Resolução N°398 (ANATEL, 2005).

3.7.5 Relações de Proteção

Em termos gerais é consenso que aonde existam canais disponíveis no espectro de RF para TV, o planejamento deve prever a utilização destes canais com a máxima potência permitida com o objetivo de se atender a área de cobertura pretendida a partir de um único transmissor, ou uma rede de transmissores, e desta forma conseguir os benefícios em termos da oferta dos serviços e da utilização do espectro. Porém, deve-se reconhecer que na realidade, a situação está bem distante da ideal e existem inúmeros problemas para se encontrar o espectro necessário, e os locais disponíveis para a transmissão.

3.7.5.1 Interferência do Canal Digital no Analógico

Deve-se considerar a inclusão dos canais digitais com base no “compartilhamento” do espectro com os canais analógicos já existentes e sendo assim é necessário definir os graus de degradação aceitáveis no serviço analógico, provocado pela **Interferência de Co-Canal (ICC)** e **Interferência de Canal Adjacente (ICA)**, do serviço digital. De uma forma geral, o espectro da transmissão digital tem característica espectral similar ao ruído Gaussiano e sendo assim, o efeito da ICC provoca um aumento do nível de ruído nos receptores analógicos, degradando assim a qualidade da imagem necessária no limite da área de cobertura do sinal. No início das transmissões digitais serão utilizados os canais vagos existentes entre os canais

⁶⁵ D/U: *Desired/Undesired*.

analógicos e poderá ocorrer nestes casos uma sobreposição do canal digital nos canais analógicos adjacentes, por este motivo, a máscara de transmissão dos transmissores digitais deverão estar dentro dos limites especificados para não provocar uma degradação no sinal analógico existente. A Figura 3.11 mostra as relações de proteção do canal digital interferente no canal analógico desejado.

Interferências de Co-Canal e Canal Adjacente

Canal Desejado (D) = Analógico

Canal Interferente (U) = Digital

Relação de Proteção (dB) = $D_{dB} - U_{dB}$

Figura 3.11. Relações de proteção do canal digital no analógico

A ANATEL define as relações de proteções necessárias para evitar a degradação do canal analógico de acordo com a Tabela 3.5.

Tabela 3.5. Relações de proteção do canal digital no analógico

Localização do Canal Digital Interferente	Canal Analógico Desejado (N)
ICC N (co-canal)	+ 34 dB
ICA N-1 (adjacente inferior)	-11 dB
ICA N+1 (adjacente superior)	-11 dB

Fonte: Anatel, Resolução N°398 (ANATEL, 2005).

3.7.5.2 Interferência do Canal Analógico no Digital

As principais fontes da ICC do sinal analógico no sinal digital estão centradas em torno das frequências das portadoras de vídeo, áudio e da subportadora de cor do sistema analógico.

A energia concentrada nestas frequências é alta devido a sua banda de transmissão ser bastante estreita e desta forma pode interferir sobremaneira no sinal digital reduzindo assim o seu desempenho. Também os produtos de intermodulação destas frequências podem causar interferências em outros canais do espectro.

Desta forma, os sistemas de proteção de erro do sistema de transmissão devem ter condições suficientes de reduzir ao máximo estas interferências, através de uma escolha adequada do esquema de modulação e das taxas dos codificadores de erro para cada ambiente onde a transmissão estará sendo realizada. Esta característica mostra também a flexibilidade de um sistema de modulação e conseqüentemente aumenta a sua robustez. A Tabela 3.6, mostra os valores definidos pela ANATEL para as relações de proteção do canal analógico no canal digital e a Figura 3.12 mostra as relações de proteção do canal analógico interferente no canal digital desejado.

Tabela 3.6. Relações de proteção do canal analógico no digital

Localização do Canal Analógico Interferente	Canal Digital Desejado (N)
ICC N (co-canal)	+7 dB
ICA N-1 (adjacente inferior)	-26 dB
ICA N+1 (adjacente superior)	-26 dB

Fonte: Anatel, Resolução N°398 (ANATEL, 2005).

Interferências de Co-Canal e Canal Adjacente
Canal Desejado (D) = Digital
Canal Interferente (U) = Analógico
Relação de Proteção (dB) = DdB - UdB

Figura 3.12. Relações de proteção do canal analógico no digital

3.7.5.3 Interferência do Canal Digital no Digital

Dada a similaridade com o ruído do espectro de transmissão de um sinal digital, a sua susceptibilidade em relação a ICC é praticamente idêntica a sua susceptibilidade ao ruído térmico, ou seja, um aumento da susceptibilidade conforme os níveis de modulação aumentam para níveis mais elevados, de QPSK para 16QAM e 64QAM (teoricamente 7 dB e 13 dB, respectivamente). Também neste caso os sistemas corretores de erro apresentam flexibilidade para permitir o alto desempenho do sistema. A Tabela 3.7, mostra os valores definidos pela ANATEL para as relações de proteção do canal digital no canal digital e a Figura 3.13 mostra as relações de proteção do canal digital interferente no canal digital desejado.

Tabela 3.7. Relações de proteção do canal digital no digital

Localização do Canal Digital Interferente	Canal Digital Desejado (N)
ICC N (co-canal)	+19 dB
ICA N-1 (adjacente inferior)	-24 dB
ICA N+1 (adjacente superior)	-24 dB

Fonte: Anatel, Resolução N°398 (ANATEL, 2005).

Interferências de Co-Canal e Canal Adjacente

Canal Desejado (D) = Digital

Canal Interferente (U) = Digital

Relação de Proteção (dB) = $D_{dB} - U_{dB}$

Interferência de Co-Canal (ICC)

Relação de Proteção = Canal Desejado (D) em dB – Canal Interferente (U) em dB
 Relação de Proteção = $D \text{ (dB)} - U \text{ (dB)}$
 Relação de Proteção = + 19 dB

Interferência de Canal Adjacente Inferior (ICA N-1)

Relação de Proteção = Canal Desejado (D) em dB – Canal Interferente (U) em dB
 Relação de Proteção = $D \text{ (dB)} - U \text{ (dB)}$
 Relação de Proteção = -24 dB

Interferência de Canal Adjacente Superior (ICA N+1)

Relação de Proteção = Canal Desejado (D) em dB – Canal Interferente (U) em dB
 Relação de Proteção = $D \text{ (dB)} - U \text{ (dB)}$
 Relação de Proteção = -24 dB

Figura 3.13. Relações de proteção do canal digital no digital

3.8 Conclusão do Capítulo

A digitalização dos canais de TV trará benefícios tanto para o radiodifusor como para o telespectador, e, além disso, contribuirá enormemente para uma melhor equalização do espectro de RF nas bandas de TV em VHF e UHF. Este capítulo apresentou as características que deverão ser consideradas na digitalização dos sistemas de transmissão, principalmente relacionadas às interferências de co-canal e canal adjacente, muito forte nas grandes regiões metropolitanas. As relações de proteções apresentadas neste capítulo são as determinadas pela ANATEL e que foram utilizadas para o plano de canalização digital no Brasil. Deve-se considerar também a contribuição apresentada do modelo chinês de TV digital, que por ser muito recente a sua adoção, ainda carece de literatura específica e este tópico em particular poderá ser de grande auxílio para a continuidade das pesquisas.

4 O Sistema Brasileiro de TV Digital - SBTVD

O objetivo deste capítulo é apresentar o Sistema Brasileiro de TV Digital - SBTVD, as normas técnicas relacionadas a cada um dos módulos do sistema e as normas ABNT que compõem o SBTVD.

No dia 29 de junho de 2006 foi publicado o Decreto Presidencial Nº5820 (PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA, 2006) estabelecendo o Sistema Brasileiro de TV Digital. O resultado do trabalho conjunto de 83 instituições de pesquisa e desenvolvimento do país, agrupadas em 21 consórcios que ao longo de dois anos trabalharam no desenvolvimento do sistema, foi a escolha do ISDB-T_B - “*Integrated Services for Digital Broadcasting - Terrestrial Brasil*” como o modelo mais adequado às características e necessidades brasileiras. O ISDB-T_B foi concebido para prover a radiodifusão multimídia para dispositivos móveis, portáteis e fixos. A modulação é hierárquica, baseada na modulação BST-OFDM do sistema japonês ISDB-T, com 6 MHz de largura de banda transmitidos pelo ar nas bandas de VHF e UHF. A codificação de vídeo adotada para o serviço fixo é H.264/AVC@L4.0 com formatos 480, 720 e 1080 linhas, e para o serviço móvel é H.264 BP@L1.3 com formatos QVGA, SQVGA e CIF. A codificação de áudio adotada para o serviço fixo é MPEG-4 HE-AAC@L4 e para o serviço móvel MPEG-4 HE-AAC@L3. O *Middleware* adotado para o sistema foi desenvolvido no Brasil e chamado de Ginga.

Uma das características do ISDB-T_B é a flexibilidade, onde um ou mais *Transport Streams* (TS), no formato *MPEG-2 System*, podem ser multiplexados para formarem um único TS. Este TS é inserido em diversas etapas de codificação de canal de acordo com as especificações do sistema e então transmitido pelo ar como sendo um único sinal OFDM. O sistema também possui *time interleaving*, que permite uma maior robustez na codificação de canal para recepções móveis, onde as constantes variações da intensidade de campo do sinal são inevitáveis.

O espectro de transmissão do sinal consiste em 13 blocos OFDM (segmentos OFDM) sucessivos, com largura de banda igual a 1/14 de 6 MHz (428,572 KHz) por segmento. O sistema permite diferentes combinações dos segmentos de acordo com as necessidades de taxas de transmissão e serviços desejados. O ISDB-T_B foi desenvolvido para prover uma robusta proteção contra interferências e ter uma alta qualidade de áudio, vídeo e transmissão de dados (BEDICKS JUNIOR, et al., 2007).

A Figura 4.1 mostra um diagrama de blocos das sete normas do sistema ISDB-TB, que foram elaboradas pelos Grupos de Trabalho do Módulo Técnico do Fórum do Sistema Brasileiro de TV Digital.

FIGURA 4.1. ISDB-T_B

- a) N01: Transmissão Terrestre, baseada na norma ARIB STD-B31;
- b) N02: Codificação de Áudio e Vídeo, baseada nas normas ITU-T H.264 e ISO/IEC 14496-3;
- c) N03: Multiplexação e Serviços de Informação, baseada na norma ARIB STD-B10;
- d) N04: Receptores, baseada nas normas ARIB STD-B10, ITU-T H.264 e ISO/IEC 14496-3;
- e) N05: Proteção de Conteúdo ou *Digital Rights Management* – DRM, baseada na ARIB STD B-25;
- f) N06: Codificação de dados e especificação de transmissão para a radiodifusão digital, baseada nas normas ARIB STD-B24, ETSI TS 101 812 (*Global Executable MHP – GEM*) e ETSI TS 102 819;
- g) N07: Canal de Interatividade, baseada nas normas ARIB STD-B21, ARIB STD-B24 e ETSI TS 101.

Os Grupos de Trabalho fizeram parte da comissão especial da ABNT, elaborando as respectivas normas que receberam a seguinte nomenclatura:

- a) N01: ABNT NBR 15.601 (ABNT, 2007)
- b) N02: ABNT NBR 15602 (ABNT, 2007), (ABNT, 2007), (ABNT, 2007)
- c) N03: ABNT NBR 15603 (ABNT, 2007), (ABNT, 2007), (ABNT, 2007)
- d) N04: ABNT NBR 15604 (ABNT, 2007)
- e) N05: ABNT NBR 15605 (ABNT, 2007)
- f) N06: ABNT NBR 15606 (ABNT, 2007), (ABNT, 2007), (ABNT, 2007)
- g) N07: ABNT NBR 15607 (ABNT, 2007)

4.1 Transmissão Terrestre – N01

Com o objetivo de uma análise mais detalhada, é apresentada no Anexo B, a técnica de modulação OFDM, que é utilizada na modulação BST-OFDM do sistema ISDB-T_B. A modulação BST-OFDM foi desenvolvida para permitir a transmissão da TV digital terrestre com modulação hierárquica e com maior flexibilidade de serviços. O canal de 6 MHz é dividido em 14 segmentos de 428,57 KHz, dos quais 13 segmentos são utilizados e o segmento restante, dividido em dois, funciona como uma banda de guarda no início do canal e no final do canal, como mostra a Figura 4.2.

Figura 4.2 – Transmissão OFDM com Banda Segmentada: BST-OFDM

Nestes 13 segmentos é possível a transmissão de até três serviços distintos e simultâneos, com diferentes características de modulação e robustez. A Figura 4.3 mostra um exemplo de uma transmissão no mesmo canal de 6 MHz, de três serviços: a) um serviço HDTV ocupando 9 segmentos, com modulação 64-QAM destinado aos receptores fixos HDTV; b) um serviço SDTV ocupando 3 segmentos, com modulação 16-QAM, destinado aos receptores fixos SD e receptores móveis; c) um serviço LDTV (1Seg) ocupando 1 segmento, com modulação QPSK, destinado aos receptores portáteis.

Figura 4.3. Flexibilidade de Serviços

Tabela 4.1 Flexibilidade

	Serviço	Segmentos	Modulação	Modo	FEC	GI	TI (ms)	Taxa de Bits (bps)
1	HDTV	9	64-QAM	8K	3/4	1/16	200	13.382.106
	SDTV	3	16-QAM	8K	3/4	1/16	200	2.973.801
	1 Seg	1	QPSK	8K	2/3	1/16	200	440.563
2	HDTV	9	64-QAM	8K	3/4	1/8	200	12.638.655
	SDTV	3	16-QAM	8K	3/4	1/8	200	2.808.590
	1 Seg	1	QPSK	8K	2/3	1/8	200	4.416.087
3	HDTV	9	64-QAM	8K	2/3	1/16	200	11.895.205
	SDTV	3	16-QAM	8K	2/3	1/16	200	2.643.379
	1 Seg	1	QPSK	8K	1/2	1/16	200	330.422
4	HDTV	9	64-QAM	8K	2/3	1/8	200	11.234.360
	SDTV	3	16-QAM	8K	2/3	1/8	200	2.496.524
	1 Seg	1	QPSK	8K	1/2	1/8	200	312.065
5	HDTV	9	64-QAM	8K	1/2	1/4	200	7.583.193
	SDTV	3	16-QAM	8K	1/2	1/4	200	1.685.154
	1 Seg	1	QPSK	8K	1/2	1/4	200	280.859

A tabela 4.1 apresenta uma proposta de flexibilidade com diferentes taxas de bits para diferentes tipos de serviços na configuração proposta na figura anterior. Estas configurações variam em função da área de cobertura que se pretende atingir, da morfologia do terreno e construções, da potência de transmissão irradiada, e da localização do serviço (área urbana, área rural, baixa densidade populacional, alta densidade populacional, etc.). O objetivo é ajustar o sistema para a melhor robustez dentro da área de cobertura pretendida para os serviços. A Figura 4.4 mostra um diagrama de blocos do sistema ISDB-T_B. O sinal fonte é codificado de acordo com o serviço pretendido, encaminhado ao multiplexador (MUX), ao re-multiplexador que faz a inserção das tabelas do sistema e em seguida ao modulador. Desta forma, o canal de TV com 6 MHz de largura de banda pode ser dividido em diferente tipos de serviços e cada um deles é transmitido em uma camada (*layer*), que consiste em um ou mais segmentos OFDM com parâmetros específicos de modulação, codificação interna (*inner code*), taxa de codificação (*coding rate*), e duração do entrelaçamento de tempo (*time interleaving*), para cada uma delas. Este tipo de transmissão é definido como transmissão hierárquica. O sistema ISDB-T_B aceita até três camadas hierárquicas, incluindo àquela, de um segmento, destinada ao serviço portátil. O número de segmentos e os parâmetros da codificação de canal para cada camada hierárquica são definidos de acordo com o modelo de negócio de cada um dos radiodifusores. Na transmissão é inserida também a tabela “*Transmission and Multiplexing Configuration Control*”, TMCC que carrega informações importantes para o controle do sistema e para auxiliar no sistema de recepção.

Figura 4.4. Diagrama de Blocos do Sistema ISDB-T_B

Devido à robustez ao efeito *doppler* durante a recepção móvel e portátil, e também a conveniência das distâncias entre os transmissores de uma SFN⁶⁶, o ISDB-T_B oferece três possibilidades de separação entre as portadoras OFDM, identificadas como modos do sistema.

Os espaços disponíveis entre as portadoras OFDM são de aproximadamente 4 KHz no modo 1, 2 KHz no modo 2, e 1 KHz no modo 3. O número de portadoras utilizadas varia, dependendo do modo, mas a taxa de bits da informação que pode ser transmitida permanece a mesma para os três modos. Todas as especificações técnicas relacionadas a codificação de canal atendem aos requisitos estabelecidos no capítulo 3 da norma ARIB STD-B31 e também está em conformidade com a recomendação ITU-R BT.1306-3. Um sumário dos parâmetros técnicos do sistema ISDB-T_B está mostrado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Parâmetros do ISDB-T_B

PARÂMETROS		VALORES PARA O ISDB-T _B			
1	Número de Segmentos	13			
2	Largura de Banda do Segmento	6.000.000 Hz / 14 = 428,57 KHz			
3	Largura de Banda Útil	Modo 1 = 5,575 MHz Modo 2 = 5,573 MHz Modo 3 = 5,572 MHz			
4	Número de Portadoras Transmitidas	Modo 1 = 1.405 portadoras Modo 2 = 2.809 portadoras Modo 3 = 5.617 portadoras			
5	Esquema de Modulação	DQPSK, QPSK, 16-QAM, e 64-QAM			
6	Tempo de Duração de um Símbolo Ativo	Modo 1 = 252 μs Modo 2 = 504 μs Modo 3 = 1.008 μs			
7	Espaçamento entre as Portadoras	Modo 1 = 3,968 kHz Modo 2 = 1,984 kHz Modo 3 = 0,992 kHz			
8	Tempo de Duração do Intervalo de Guarda		1/4	1/8	1/16
		Modo 1	63μs	31,5μs	15,75μs
		Modo 2	126μs	63μs	31,5μs
		Modo 3	252μs	126μs	63μs
9	Tempo de Duração Total de um Símbolo	Modo 1	315μs	283,5μs	267,75μs
		Modo 2	628μs	565μs	533,5μs
		Modo 3	1.260μs	1.134μs	1.071μs
10	Tempo de Duração de um Frame de Transmissão	204 Símbolos OFDM			
11	Codificação Interna de Canal	Código Convolutacional: 2/3, 3/4, 5/6, e 7/8			
12	Entrelaçamento Interno	De Freqüência: intra e inter segmentos De Tempo: 0; 380; 760; 1.520 símbolos			

Fonte: NBR 15601 (ABNT, 2007)

A Figura 4.5 mostra o espectro de radiofrequência nas faixas de VHF e UHF, alocado pela ANATEL para o serviço de radiodifusão de TV digital terrestre. Na parte superior estão mostrados os canais e na parte inferior as freqüências, em MHz.

⁶⁶ SFN: *Single Frequency Networks*. Redes de Freqüência Única.

Figura 4.5. Espectro de RF alocado para TV Digital Terrestre

Devido à necessidade de proteção aos canais analógicos adjacentes (N+1 e N-1), o centro das portadoras OFDM foi deslocado para cima em 1/7 MHz da frequência central do canal alocado no plano básico de distribuição de TV digital (PBTVD⁶⁷). Por exemplo, o centro das portadoras OFDM do canal 14 UHF (470~476 MHz) será 473 MHz + 1/7 MHz, ou seja, 473,142857 MHz e assim por diante para os todos os canais digitais.

Considerando que a modulação BST-OFDM utilizada no ISDB-T_B é basicamente a modulação OFDM com algumas modificações, como a segmentação da banda e o “*Time Interleaving*”, é importante o conhecimento da técnica de modulação OFDM, apresentada no ANEXO B, com seus fundamentos e características que fizeram dela a mais utilizada no mundo para a transmissão de sinais digitais e para as tecnologias “*wireless*”.

4.2 Codificação de Áudio e Vídeo – N02

Esta norma especifica o uso do H.264 como codificador e ferramenta de transporte no Sistema Brasileiro de TV Digital.

4.2.1 Principais Parâmetros do Áudio

A taxa de amostragem do áudio deve ser 32 kHz; 44,1 kHz ou 48 kHz. Para sinais estereofônicos e multicanais (por exemplo, canais que possuem dois ou mais sinais de áudio, para obter o efeito 3D), a taxa de amostragem para todos os canais deve ser a mesma. A quantização dos sinais de entrada deve utilizar 16 bits ou mais e um programa de áudio deve ter no mínimo um canal de áudio. O número máximo de canais nos programas é limitado ao número máximo de canais permitido pela norma ISO/IEC 14496-3:2005. Em cada programa de áudio o número máximo de canais de áudio em sistemas multicanais deve ser compatível com a norma ITU BS. 775-1, ou seja, cinco canais e mais um canal utilizado para o reforço das baixas frequências (LFE⁶⁸).

⁶⁷ PBTVD: Plano Básico de Distribuição de Canais de TV Digital. Publicado pela ANATEL.

⁶⁸ LFE: *Low Frequency Enhancement*.

Serão permitidos fluxos de bits ou arquivos contendo áudio PCM⁶⁹ não comprimido nos formatos PCM WAVE ou AIFF, fluxo de bits estéreo e multicanal AES3 (AES/EBU, contendo dois canais PCM por fluxo de bits). Um quadro estéreo de áudio no formato AES3 tem 64 bits (32 bits por canal) que devem ser enviados a cada 20,883 μ s. O tempo de duração dos bits de dados no quadro é $20,883 \mu\text{s}/64 = 325,52 \text{ ns}$.

O número de amostras de áudio por quadro de vídeo é dado pelo tempo de duração do quadro de vídeo dividido pelo tempo de duração do quadro de áudio. A referência do nível de áudio deve ser 0 dBm. A faixa dinâmica permitida é limitada a + 20 dB (*headroom*) e -70 dB, correspondendo com a faixa dinâmica típica de 90 dB. A taxa de amostragem de referência para os sinais de áudio deve ser 48 kHz, o que é o padrão recomendado. Será permitido, porém, sinais de áudio amostrados com frequências de amostragem de 32 kHz e 44,1 kHz. Para permitir os serviços multicanais com reprodução especial e *surround*, todos os sinais de áudio (canais) devem utilizar a mesma frequência de amostragem, o mesmo tempo de amostragem e sincronismo. O número de bits de quantização deve ser 16, 20, 24 ou 32 bits.

Os serviços adicionais de áudio são opcionais e são transmitidos em conjunto com os canais de áudio. Os programas adicionais de áudio são geralmente utilizados para transmitir outros idiomas e programas, adicionalmente ao programa principal (SAP⁷⁰, por exemplo), serviços de descrição de áudio, e áudio secundário proveniente de outras fontes. A transmissão de canais auxiliares de áudio adicionalmente aos modos principais é permitida utilizando-se a sinalização descritiva do programa principal de acordo com a norma ISO/IEC 144963 e ARIB STD-B32 parte 2. Os canais auxiliares de áudio devem preferencialmente estar inclusos no mesmo *bitstream* do programa principal (LATM⁷¹, por exemplo), com sinalização dupla e identificação dos canais, para permitir a decodificação e reprodução em conjunto com os canais principais de áudio do mesmo programa. Se for escolhida a opção de transmitir os canais auxiliares em um *stream* diferente daquele do programa principal (programas múltiplos em distintos LATM, por exemplo), a compatibilidade do terminal de acesso deverá ser verificada para não excluir a reprodução desses programas. No caso de programas de áudio disponíveis em dois idiomas, é recomendado que cada programa deva ser enviado em um *stream* separado (programas múltiplos em distintos LATM, por exemplo). O número máximo de programas auxiliares está limitado pelo número máximo de canais disponíveis no *bitstream* do programa principal. Portanto, é recomendável que este número

⁶⁹ PCM: *Pulse Code Modulation*.

⁷⁰ SAP: *Second Audio Program*.

⁷¹ LATM: *Low Overhead Audio Transport Multiplex*.

não exceda a metade do número de canais do programa principal. Os canais auxiliares podem ser de quatro tipos: AUX1: Idioma Alternativo; AUX2: AD⁷²; AUX3: Conteúdo Musical; AUX4: Efeitos Especiais. Deve ser utilizado um dos mecanismos de transmissão de dados privados existentes no TS (anexo H da norma ISO/IEC 13818-1) para a sinalização do serviço de áudio ou de um canal auxiliar. O tipo de canal e a sua localização no *bitstream* (PID + a posição no áudio ES) são identificados na descrição do canal. Esta informação é necessária para o terminal de acesso e o decodificador identificarem que tipo de multiplexagem deve ser utilizado. O formato do quadro e a sintaxe do *bitstream* são especificados de acordo com o padrão MPEG-4 AAC⁷³ e a norma ISO/IEC 14496-3. O padrão MPEG-4 AAC é definido como o sistema de codificação de áudio para a radiodifusão digital terrestre. Os perfis permitidos do MPEG-4 AAC são os seguintes:

- a) LC⁷⁴, perfil básico do padrão AAC;
- b) HE⁷⁵, perfil avançado com alta eficiência, combinando o perfil LC com o uso da ferramenta SBR⁷⁶.

A Tabela 4.3 mostra os perfis de áudio para os serviços fixos e móveis e a Tabela 4.4 mostra os perfis de áudio para o serviço portátil (1 Seg).

Tabela 4.3 – Perfil de áudio MPEG-4 AAC para os serviços fixos e móveis

	Parâmetro	Descrição
1	Formato do <i>bitstream</i>	AAC LATM/LOAS ⁷⁷
		Mono
2	Número de canais	Estéreo Paramétrico
		Estéreo dois canais
		Multicanal 5.1
3	Perfis e Níveis	AAC:Level 4 (AAC@L4)
		High Efficiency (HE):Level 2 (HE-AAC@L2)
		High Efficiency (HE):Level 4 (HE-AAC@L4)
4	Padrão	Como limitado na norma ISO/IEC 14496-3 com os adendos 1 e 2
5	Taxa máxima de bits	Como definido na norma ISO/IEC 14496-3

Fonte: NBR 15602 (ABNT, 2007)

Tabela 4.4 – Perfil de áudio para o serviço portátil (1 Seg)

	Parâmetro	Descrição
1	Formato do <i>bitstream</i>	AAC LATM/LOAS
2	Número de canais	2 canais por <i>bitstream</i>
3	Perfis e Níveis	High Efficiency (HE):Level 3 (HE-AAC@L3)
4	Taxa máxima de bits	Como definido na norma ISO/IEC 14496-3

Fonte: NBR 15602 (ABNT, 2007)

⁷² AD: *Audio Description*.

⁷³ AAC: *Advanced Audio Codec*.

⁷⁴ LC: *Low Complexity*.

⁷⁵ HE: *High Efficiency*.

⁷⁶ SBR: *Spectral Band Replication*.

⁷⁷ LOAS: *Low Overhead Audio Stream*.

4.2.2 Principais Parâmetros do Vídeo

O sistema de codificação de vídeo utilizado no Sistema Brasileiro de TV Digital está de acordo com a recomendação ITU-T H.264 e ISO/IEC 14496-10, às quais deverão ser aplicadas as restrições a seguir.

As resoluções de luminância permitidas são: 720x480, 1.280x720 e 1.920x1.080, com resoluções de aspecto 4:3 e 16:9, de acordo com a Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Resoluções de luminância

	Tipo	Resolução de Luminância (Horizontal x Vertical)	Relação de Aspecto (Horizontal x Vertical)
1	SD	720 x 480	4:3
			16:9
		720 x 576	4:3
			16:9
2	HD	1.280 x 720	16:9
		1.920 x 1.080	16:9

Fonte: NBR 15602 (ABNT, 2007)

A taxa de quadro do codificador deve ser 24000/1001, 24, 30000/1001, e 30 Hz e o decodificador deve suportar *bitstreams* com taxa de quadros de 24000/1001, 24, 25, 30000/1001, 30, 50, 60000/1001, e 60 Hz, conforme mostra a Tabela 4.6.

Tabela 4.6 Taxa de quadro

	Taxa de Quadro	Entrelaçado (I) ou Progressivo (P)
1	24000/1001	P
2	24	P
3	25	P
4	25	I
5	50	P
6	30000/1001	P
7	30	P
8	30000/1001	I
9	30	I
10	60000/1001	P
11	60	P

Fonte: NBR 15602 (ABNT, 2007)

A relação de aspecto do codificador deve ser 4:3 ou 16:9 e o decodificador deve suportar *bitstreams* com relação de aspecto 4:3 e 16:9.

A informação de colorimetria (coordenadas cromáticas, características de transferência optoeletrônica da fonte e do codificador e os coeficientes da matriz utilizada para extrair os sinais de luminância e croma das cores primárias, vermelha, verde e azul) deve ser explicitamente sinalizada no *bitstream*. Para a resolução SDTV é recomendada a utilização da

norma de calorimetria ITU-R BT. 470-6, e para a resolução HDTV, é recomendada o uso da norma de colorimetria ITU-R BT.709. O decodificador deve suportar ambas as resoluções (SDTV e HDTV) com qualquer valor de cores primárias, características de transferência e matriz de coeficientes. Recomenda-se um processamento adequado para garantir a precisão na representação das imagens com calorimetrias nos padrões ITU-R BT.470-6 e ITU-R BT.709.

A Tabela 4.7 mostra as áreas desejáveis de codificação para cada formato de entrada. Após o processo de decodificação, as linhas ativas dos sinais gerados pelo decodificador devem estar de acordo com a mesma tabela.

Tabela 4.7 – Área de codificação

	Formato	Linhas Ativas	Linhas Codificadas
1	1125i	1080	1080
2	750p	720	720
3	525p	483	480
4	525i	483	480

Fonte: NBR 15602 (ABNT, 2007)

Tabela 4.8 – Restrições de codificação para os dispositivos portáteis

	Descrição	Especificação
1	Taxa de bits	64 kbps até 384 kbps
2	Resolução da imagem	SQVGA
		525QSIF
		QCIF
		525SIF
3	Taxa de quadro (Hz)	CIF
		5
		10
		12
		15
		24
3	Relação de Aspecto	30
		É permitido o descarte de quadros
		4:3
4	Nível	16:9
5	Outras restrições	Até 1.3, dependendo da aplicação
		FMO (Flexible Macroblock Ordering)
		ASO (Arbitrary Slice Ordering)
		Pode ser usado RS (Redundant Slice)

Fonte: NBR 15602 (ABNT, 2007)

A Tabela 4.8 mostra as configurações de codificação de vídeo LD (*Low Definition*) recomendadas para o serviço “one seg” para dispositivos portáteis. Os dispositivos portáteis e os *bitstreams* devem ser compatíveis com as restrições impostas pelo perfil BP (*Baseline Profile*). O *bitstream* deve estar de acordo com as restrições impostas pelo nível 1.3.

São permitidas as resoluções até o limite imposto pelo nível 1.3, restringindo-se o número máximo de macroblocos para cada quadro em 396. Este número ajusta-se a resolução

máxima da luminância de 352 x 288 (CIF). A Tabela 4.9 mostra as resoluções permitidas para o serviço portátil (1 Seg).

Tabela 4.9 – Resoluções para 1Seg

	Formato	Resolução (Horizontal x Vertical)	Relação de Aspecto (Horizontal x Vertical)
1	SQVGA	160 x 120	4:3
2	SQVGA	160 x 90	16:9
3	QVGA	320 x 240	4:3
4	QVGA	320 x 180	16:9
5	CIF	352 x 288	4:3

Fonte: NBR 15602 (ABNT, 2007)

4.3 Multiplexação e Serviços de Informação – N03

Esta norma do Sistema Brasileiro de TV Digital especifica o processo de multiplexação dos sinais de radiodifusão (áudio, vídeo e dados), os mecanismos de transporte e a estrutura dos fluxos de dados, de acordo com a norma ITU-T H.222/ISO/IEC 13818-1. Esta norma se destina a especificar os tipos de sinal e a estrutura de dados do Serviço de Informação (SI⁷⁸) e os padrões operacionais dos identificadores utilizados pelo Sistema Brasileiro de TV Digital. A norma incorpora especificações dos seguintes documentos: 1) ARIB STD-B10 (ARIB, 2003); 2) ARIB TR-B14 (ARIB, 2006); 3) ARIB STD-B32 (ARIB, 2004); 4) EN 300468-V1.4.1; 5) ITU-T H.222/ ISO/IEC 13818-1.

A transmissão dos sinais codificados de áudio e vídeo, dados, metadados, e informações correlatas devem atender as seguintes regras:

- a) Os sinais codificados devem ser multiplexados em pacotes;
- b) Os sinais codificados devem ser agrupados em comprimentos arbitrários.

A Figura 4.6 mostra a estrutura do Multiplexador (MUX), onde os pacotes provenientes de diversas fontes são encaminhados a entrada do MUX no formato MPEG-2 TS, são multiplexados e a saída é um TS no formato MPEG-2 TS contendo os sinais de entrada.

A saída do MPEG-2 TS MUX é conectada ao re-multiplexador (REMUX), mostrado na Figura 4.7, que insere as tabelas TMCC⁷⁹ e IIP⁸⁰ e que por sua vez produz na saída novos pacotes de 204 bytes (188 bytes originados no MUX e mais 16 bytes das tabelas inseridas pelo REMUX) denominados TSP⁸¹, como mostra a Figura 4.8.

⁷⁸ SI: *Service Information*.

⁷⁹ TMCC: *Transmission and Multiplexing Configuration Control*.

⁸⁰ IIP: *ISDB-T_B Information Packet*.

⁸¹ TSP: *Transport Stream Packet*.

Figura 4.6. Multiplexador

Figura 4.7. Re-Multiplexador

Figura 4.8. Transport Stream Packet

Os TSPs são agrupados em uma nova sequência produzida pelo REMUX formando assim um novo TS denominado BTS⁸². Dentro do BTS os TSPs são agrupados em configurações distintas formando um “Quadro Multiplexado”, como mostra a Figura 4.9.

Figura 4.9. Quadro Multiplexado

O tamanho do quadro multiplexado dependerá da configuração e deve estar de acordo com a Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Configuração do quadro multiplexado

Modo		Número de TSPs inclusos em um quadro multiplex			
		Intervalo de Guarda			
		1/4	1/8	1/16	1/32
1	Modo 1	1.280	1.152	1.088	1.056
2	Modo 2	2.560	2.304	2.176	2.112
3	Modo 3	5.120	4.608	4.352	4.224

Fonte: NBR 15603 (ABNT, 2007)

4.4 Receptores – N04

Esta norma especifica um conjunto essencial de funcionalidades necessárias aos receptores fixos, móveis e portáteis. As especificações estão de acordo com a norma ARIB STD-B21 (ARIB, 2003), excluindo a parte referente à recepção via satélite que não é aplicável ao ISDB-T_B.

A configuração básica para um receptor para o Sistema Brasileiro de TV Digital é apresentada na Figura 4.10, e deverá ser compatível com as seguintes especificações:

- Entrada: O sinal RF de entrada deve estar na faixa de VHF, canais 7 a 13 e UHF, canais 14 a 69, conforme especificado na NBR 15601 (ABNT, 2007);
- Impedância de entrada: 75 ohms;
- Largura de Banda: compatível com a norma NBR 15601 (ABNT, 2007). Receptores fixos e portáteis: 5,7 MHz. Receptores portáteis (*one seg*): 0,43 MHz.

⁸² BTS: *Broadcast Transport Stream*.

- d) Frequência da portadora central dos canais: compatível com a Tabela 3 da norma NBR 15601 (ABNT, 2007);
- e) Sensibilidade: -20 dBm ~ -77 dBm;
- f) Seletividade: compatível com a Tabela 5 da norma NBR 15601 (ABNT, 2007);
- g) Frequência de FI: 44 MHz ou conversão direta em banda base;
- h) Faixa de sincronização da frequência recebida: o oscilador local deve ser capaz de sintonizar desvios de frequências iguais ou superiores a 30 kHz;
- i) Faixa de sincronização do *clock* recebido: o receptor deve ser capaz de sintonizar desvios iguais ou superiores a 20 ppm;
- j) Processamento do sinal no *Front End*: deve estar de acordo com a norma NBR 15601 (ABNT, 2007) e ARIB STD-B21 (ARIB, 2003);
- k) Processamento do TS no receptor deve estar de acordo com a norma NBR 15603 e obrigatoriamente disponibilizar filtros de seção para suportar os quatro seguintes formatos de seção para os dados estipulados na ISO/IEC 13818-1: i) cada seção composta de um pacote TS; ii) múltiplas seções de um pacote TS (entretanto o número máximo de seções incluídas em um único pacote TS está limitado em dez); iii) máximo número de seção PMT⁸³ em um único pacote TS está limitado a 4; iv) cada seção composta de dois ou mais pacotes de TS;
- l) Acesso Condicional: não é aplicável ao sistema ISDB-T_B;
- m) Memórias: o receptor deve ter a capacidade de memorizar o conteúdo de dados recebido. É recomendável uma memória volátil de no mínimo 2 MB. O receptor também deve armazenar os códigos do programa e os dados comuns. O receptor que dispuser de *middleware* instalado em sua arquitetura deve disponibilizar 2 MB ou mais de memória volátil para conteúdos de dados transmitidos com ciclo de vida definido pela aplicação. Esta alocação de memória não inclui o espaço necessário para as aplicações residentes carregadas pelo ar ou qualquer outro meio. A definição de alocação de memória para estes casos deve ser definida pelo fabricante do dispositivo receptor. O receptor deve dispor de memória não volátil para o armazenamento de códigos de programa. O receptor deve dispor de memória para o armazenamento de códigos de dados comuns a todos receptores, conforme a ARIB STD-B21 (ARIB, 2003);

⁸³ PMT: *Program Map Tables*.

- n) Decodificador de vídeo e interfaces de saída de vídeo: o receptor deve ser capaz de decodificar um fluxo de vídeo H.264/AVC, de acordo com a NBR 15602-1 (ABNT, 2007). Os perfis e níveis, decodificação dos serviços primários, formatos e taxa de quadros, sinais e interfaces de saída de vídeo analógico e digital, saída de RF, entre outros parâmetros, devem estar de acordo com as especificações descritas no item 8.1 da norma NBR 15602-1;
- o) Decodificador de áudio e interfaces de saída de áudio: o receptor deve ser capaz de decodificar um fluxo de bits de áudio no padrão MPEG-4 AAC, de acordo com a norma NBR 15602-2. Os parâmetros para decodificação de áudio, perfis e níveis, decodificação do fluxo de bits primário, interfaces de saída analógica ou digital, devem estar de acordo com as especificações descritas no item 8.2 da norma NBR 15602-1;
- p) Proteção de cópias: o receptor deve atender a norma NBR 15605 (ABNT, 2007);
- q) Decodificador de dados primários: deve atender a norma NBR 15605 (ABNT, 2007) e ARIB STD-B21 (ARIB, 2003). O porte do *middleware* Ginga é opcional, mas desde que colocado no receptor, os requisitos mínimos devem necessariamente ser atendidos;
- r) EPG⁸⁴: a implementação é facultada aos fabricantes dos receptores;
- s) Classificação indicativa: a implementação de dispositivos de bloqueio de programação classificados por idade ou conteúdo é de implementação obrigatória;
- t) Acessibilidade: mesmo que de transmissão obrigatória, os recursos de acessibilidade são de implementação facultativa em qualquer tipo de receptor. Os recursos que compõe o conjunto de acessibilidade são: i) *closed caption*; ii) áudio-descrição; iii) locução; iiiii) dublagem; iiiii) janela de LIBRAS⁸⁵;
- u) Armazenamento e acesso aos canais: cada emissora de televisão deve dispor de um canal virtual que deve, para aquelas que atualmente operam no sistema analógico, ter a mesma numeração do atual canal físico analógico. Os canais digitais devem obrigatoriamente ser acessados no receptor, através de qualquer meio, pelo número do canal virtual. A seleção sequencial de canais, crescente ou decrescente, deve ser sempre pelo serviço primário. É facultado ao fabricante disponibilizar meios de navegação por todos os canais lógicos ou por qualquer outro modo, desde que a opção seja habilitada pelo usuário;

⁸⁴ EPG: Electronic Program Guide.

⁸⁵ LIBRAS: Língua Brasileira de Sinais.

- v) Interface de alta velocidade: nenhum tipo de interface de alta velocidade é especificado como de implementação obrigatória nos receptores.
- w) Módulo de interface comum para acesso condicional: não é aplicável ao ISDB-T_B.

Figura 4.10. Configuração básica de um receptor ISDB-T_B

4.5 Gestão de Direitos Digitais – N05

Esta norma especifica o sistema para a proteção ao direito de cópia de conteúdo no Sistema Brasileiro de TV Digital e define os mecanismos de proteção contra cópias das interfaces de identificação do receptor em conteúdos exportados e uso restrito de protocolos. Esta norma se aplica para os conteúdos em definição padrão (SDTV) e alta definição (HDTV) para TV digital terrestre. A norma não especifica o uso de sistemas de acesso condicional e nem permite a sua utilização. As interfaces de saída de vídeo analógico devem ser limitadas em 480 linhas com varredura progressiva. Nas interfaces de saídas de vídeo digital é mandatório o uso do protocolo HDCP⁸⁶. Não existe proteção nas interfaces de saída de áudio

⁸⁶ HDCP: *High Bandwidth Digital Content Protection*.

analógico. Nas interfaces de saída de áudio digital é mandatório a uso de SCMS⁸⁷ para SPDIF⁸⁸ e HDCP. É mandatório o uso de proteção nas interfaces de saída digital IP, *Firewire*, USB⁸⁹, DTCP⁹⁰ e outras.

4.6 Codificação de Dados - *Middleware*

Esta norma especifica o modelo de referência para a radiodifusão de dados, como parte do sistema ISDB-T_B. O *middleware* adotado chama-se “Ginga” e está baseado nas seguintes normas: i) ETSI TS 102 819 V1.3.1 “*Digital Video Broadcasting (DVB), Global Executable MHP (GEM)*”; ii) ITU-T Recommendation H.222.0 e ISO/IEC 13818-1 (2000) “*Information Technology – Generic Coding of Moving Pictures and Associated Audio Information*”; iii) Recommendation ITU-R BT. 1361 (1998) *Worldwide Unified Colorimetry and Related Characteristics of Future Television and Imaging Systems*; iiiii) ITU-T J.200 (2001) “*Worldwide Common Core Application Environment for Digital Interactive Television Services*”.

A arquitetura do *Middleware* para a TV interativa no sistema ISDB-T_B está de acordo com a cláusula 4.1, capítulo 4 da norma ITU-T J.200, e pode ser basicamente representada por dois importantes componentes: uma máquina de execução e uma máquina de apresentação.

Estes componentes não são independentes e é necessário estabelecer uma ponte apropriada entre as máquinas. Adicionalmente a estes componentes básicos podem ser incluídas aplicações nativas, específicas, e outros *softwares* de conteúdo. A Figura 4.11 mostra a estrutura do ambiente de aplicações Ginga, evidenciando as relações entre as máquinas de execução e apresentação.

No sistema de radiodifusão digital, áudio, vídeo e dados são multiplexados em um TS especificado pelo padrão MPEG-2 (ITU-T H.222.0, ISO/IEC 13818-1), o qual é transmitido através do canal. O canal de interatividade é disponibilizado através de uma conexão de rede independente com protocolo próprio. A pilha do protocolo utilizado no Sistema Brasileiro de TV Digital está de acordo com o capítulo 5, parte 1, volume 1, da norma ARIB STD-B24 (ARIB, 2002). O modelo de referência do receptor está de acordo com o capítulo 6, parte 1, volume 1 da norma ARIB STD-B24 (ARIB, 2002). O receptor deve ter funções para

⁸⁷ SCMS: *Serial Copy Management System*.

⁸⁸ SPDIF: *Sony/Philips Digital Interface*.

⁸⁹ USB: *Universal Serial Bus*.

⁹⁰ DTCP: *Digital Transmission Content Protection*.

possibilitar a recepção, apresentação, armazenamento e comunicação com o serviço de radiodifusão de dados, além de manter as funções básicas de um receptor normal de TV.

Figura 4.11. Estrutura do ambiente de aplicações Ginga

4.7 Canal de Interatividade – N07

O canal de interatividade proposto para o ISDB-T_B utiliza a infra-estrutura da rede de telecomunicações para enviar e receber dados. Sendo um subsistema ortogonal ao sistema de TV Digital, o canal de interatividade permite diversas alternativas como soluções tecnológicas: Rede Telefônica Fixa Comutada, Rede de Telefonia Celular, Redes de Fibras Ópticas, LAN, WLAN, Wi-Fi, WiMax e outras. Considerando a diversidade tecnológica comercialmente disponível ao longo do território brasileiro, o advento de novas tecnologias, e ainda a heterogeneidade dos possíveis serviços a serem oferecidos em cada região do país, a especificação da norma N07 define um conjunto de funcionalidades principais necessárias para permitir o uso da infra-estrutura de telecomunicações disponível comercialmente na região, desde que tecnicamente aderente ao sistema. A proposta de grande flexibilidade também oferece ao usuário a opção de escolher a rede mais apropriada para a sua região, e também a possibilidade de uma migração tecnológica no futuro sem o risco de um legado.

Esta norma apresenta um conjunto principal de funcionalidades necessárias ao receptor de sinais de TV digital para permitir o funcionamento do seu canal de interatividade. O atendimento aos parâmetros listados a seguir é mandatório para garantir a correta transmissão e recepção dos dados através do canal de interatividade, sendo uma escolha de o fabricante incluir outras funcionalidades além das mínimas apresentadas.

Entende-se por “dispositivo externo” aquele aparelho que permite transmitir e receber dados através de qualquer rede de telecomunicações que seja aderente ao sistema com canal de interatividade.

A norma N07 está dividida em quatro volumes: 1) O Volume 1 especifica as técnicas das normas ARIB STD B-23 e STD B-21 que são aderentes ao Sistema Brasileiro de TV Digital; 2) O Volume 2 especifica as técnicas das normas ARIB STD B-24 e STD B-21 que são aderentes ao Sistema Brasileiro de TV Digital; 3) O Volume 3 especifica o uso de um “dispositivo externo”, define as APIs⁹¹ que devem fazer parte do receptor para gerenciar o dispositivo externo, assim como especifica as técnicas, aderentes a norma N05, para a autenticação e certificação destes dispositivos; e 4) O Volume 4 especifica a camada física e os protocolos das principais tecnologias disponíveis e aderentes ao Sistema Brasileiro de TV Digital.

As premissas da norma N07 são:

- a) Atender aos diversos cenários existentes no país;
- b) Ter baixo impacto na arquitetura do *middleware*;
- c) Ser aderente às normas estabelecidas pelo ISDB-T_B para os dispositivos e receptores de sinais de TV digital;
- d) Acomodar o maior número possível de soluções tecnológicas;
- e) Especificar as mais importantes funcionalidades com foco na flexibilidade permitindo a implementação de inovações, desde que, não criem legados, sejam retro-compatíveis e também atendam as normas internacionais;
- f) Estar alinhada com as grandes tendências e padrões internacionais;
- g) Ser relevante ao mercado internacional para permitir um ganho de escala quando relacionada com as arquiteturas de receptores já existentes;
- h) Possuir maturidade tecnológica para garantir o desempenho e robustez;
- i) Garantir a exploração dos serviços de interatividade nos receptores com os serviços de interatividade;

⁹¹ APIs: *Application Programming Interfaces*.

- j) Disponibilizar uma interface USB nos receptores de sinais de TV digital, para possibilitar a conectividade com o dispositivo externo e a rede de telecomunicações. O fabricante do receptor tem a opção de instalar internamente em seu produto o dispositivo externo, possibilitando assim a conectividade com a rede de telecomunicações.

4.8 Conclusão do Capítulo

As informações apresentadas neste capítulo fazem parte das normas do Sistema Brasileiro de TV Digital. Algumas normas não estão ainda finalizadas e os grupos de trabalho estão recebendo contribuições e providenciando as revisões necessárias. Existe uma expectativa que até julho de 2008 todas as normas já estejam concluídas. O Módulo Técnico do Fórum do SBTVD tem reuniões semanais onde os coordenadores das normas se encontram para discutirem as especificações e integrações. Os membros do Fórum são representantes de indústrias, radiodifusores, institutos de pesquisa, universidades e governo.

5 Proposta de um Sintonizador-Demodulador para o SBTVD

O objetivo deste capítulo é destacar as características mais importantes e necessárias para se conseguir uma boa recepção do sinal digital de TV, considerando as imperfeições existentes no canal de transmissão, as interferências, o padrão de modulação adotado pelo SBTVD e as condições de transmissão e cobertura determinadas pela ANATEL, com o objetivo de apresentar uma proposta de um sintonizador-demodulador para o Sistema Brasileiro de TV Digital.

Todos os anos são produzidos mundialmente aproximadamente 300 milhões de unidades de sintonizadores que funcionam na faixa de TV. Estas unidades são integradas em uma grande variedade de produtos eletrônicos de consumo, desde os já conhecidos aparelhos de TV, conversores de TV a cabo, receptores de sinais via satélite, até dispositivos mais complexos como *cable modems*, PC/TVs e diversas aplicações relacionadas à TV digital. Funcionando como um *gateway* de RF em banda larga, a função básica de um sintonizador nestes aparelhos eletrônicos é receber todos os canais disponíveis em uma determinada banda, selecionar o canal desejado e rejeitar os outros, transladando o canal desejado para uma frequência intermediária (FI) padrão. Estes sintonizadores operam em uma faixa de frequências compreendida entre 54 a 862 MHz, considerando os canais de TV utilizados pela TV aberta e pelos operadores de TV a cabo (NORSWORTHY, 2001).

5.1 Fatores que Caracterizam o Desempenho dos Sintonizadores de TV

Os sintonizadores utilizados em produtos com funcionalidades como PC, TV e *internet* têm uma característica bastante diferente daqueles tradicionais de TV, e desta forma novas preocupações surgiram com o uso destes sintonizadores nas novas aplicações que incluem a redução do tamanho, o alto desempenho, a facilidade de manufatura, e a compatibilidade com novas normas adotadas pelo mercado como DOCSIS⁹², por exemplo.

Para os sintonizadores operando na banda de TV, o alto desempenho pode ser resumido em cinco parâmetros básicos:

⁹² DOCSIS: Data Over Cable System Interface Specification

- a) Faixa Dinâmica;
- b) Ruído de Fase (*Phase Noise*);
- c) Figura de Ruído;
- d) Resposta a Espúrios (distorção);
- e) Rejeição a Frequência Imagem.

A importância relativa de cada um desses parâmetros e a sua faixa de operação variam com as aplicações. Para o projetista das mais novas tecnologias em sistemas de comunicação, entender o desempenho dos parâmetros destes sintonizadores e avaliar suas configurações é essencial para o sucesso, alto desempenho, e baixo custo do projeto.

Em um sistema de comunicação, o sintonizador é responsável por receber todos os canais disponíveis na banda pretendida, selecionar o canal desejado e rejeitar os outros, e transladar o canal desejado para uma frequência padrão de FI. Está implícita neste processo a retenção ao máximo possível da fidelidade do sinal original recebido, não acrescentando quantidade significativa de ruído e distorções. Se os canais remanescentes não forem efetivamente rejeitados, haverá interferência no sistema de recepção e no caso da TV analógica, por exemplo, o resultado poderá ser uma qualidade de imagem e de som inadequadas para a recepção. Já na TV digital, o resultado poderá ser a perda total da imagem e do som. Nos sistemas de comunicação de dados as interferências podem resultar em perda de sinal.

Figura 5.1. Desempenho dos Sintonizadores para TV (NORSWORTHY, 2001)

A qualidade da recepção do canal é enormemente impactada pelo ruído de fase, distorção, e rejeição da frequência imagem do sistema e pela importância relativa que cada uma dessas características representa para os diferentes tipos de aplicações. No caso de

sintonizadores analógicos o melhor desempenho se obtém com uma baixa distorção e uma baixa figura de ruído, enquanto que no caso dos sintonizadores digitais a necessidade é uma alta rejeição à frequência imagem, à interferência dos canais adjacentes e um baixo ruído de fase, como mostra a Figura 5.1.

5.1.1 Faixa Dinâmica

A faixa dinâmica (DR – *Dynamic Range*) é definida como sendo a relação entre o máximo nível de sinal aceitável na entrada de um dispositivo, pelo mínimo nível de sinal necessário para que o dispositivo produza um sinal de saída aceitável. Dá-se o nome a esta definição de “Faixa Dinâmica Livre de Espúrios” (SFDR – *Spurious-Free Dynamic Range*) (RAZAVI, 1998).

5.1.1.1 Sensibilidade

A sensibilidade de um receptor é definida como sendo o mínimo nível de sinal que o sistema pode detectar com uma aceitável relação sinal-ruído. Pode-se calcular a sensibilidade como

$$N_F = \frac{SNR_{in}}{SNR_{out}} = \frac{\frac{P_{sig}}{P_{RS}}}{SNR_{out}} \quad (5.1)$$

onde a potência do sinal de entrada é dada por P_{sig} e a potência de ruído da resistência da fonte é dada por P_{RS} , ambas por unidade de largura de banda. Assim,

$$P_{sig} = P_{RS} \cdot NF \cdot SNR_{out} \quad (5.2)$$

Uma vez que a potência total do sinal está distribuída ao longo da largura de banda do canal, B , os dois lados da equação (5.2) devem ser integrados ao longo da largura de banda para se obter a potência total média. Assim, para um canal plano,

$$P_{sigtot} = P_{RS} \cdot NF \cdot SNR_{out} \cdot B \quad (5.3)$$

A equação (5.3) prediz a sensibilidade para o nível mínimo de sinal na entrada que provoca um determinado valor de SNR na saída. Alterando as notações e expressando as grandezas em dB ou dBm, tem-se

$$P_{inmin} (dBm) = P_{RS} \left(\frac{dBm}{Hz} \right) + NF(dB) + SNR_{min} (dB) + 10 \cdot \log B (Hz) \quad (5.4)$$

onde P_{inmin} é o nível de entrada mínimo que provoca a SNR_{min} e B é expressa em hertz. Considerando a entrada casada, obtém-se P_{RS} como a potência de ruído que R_S entrega para o receptor:

$$P_{RS} = \frac{4 \cdot k \cdot T \cdot R_S}{4} \cdot \frac{1}{R_{in}} = k \cdot T = -174 \text{ dBm/Hz} \quad (5.5)$$

na temperatura ambiente. Pode-se simplificar a equação (5.4) como

$$P_{inmin} (\text{dBm}) = -174 \left(\frac{\text{dBm}}{\text{Hz}} \right) + NF(\text{dB}) + SNR_{min} (\text{dB}) \quad (5.6)$$

É importante observar que a soma dos três primeiros itens da equação (5.6) é a integração total do ruído do sistema e que muitas vezes é chamada de “ piso de ruído ” (*noise floor*) (RAZAVI, 1998).

5.1.1.2 Intermodulação

Nos sistemas de RF, o limite superior da faixa dinâmica, ou o nível máximo suportável de sinal, é definido como sendo o nível máximo de entrada no teste do batimento de duas frequências no qual o produto de intermodulação de terceira ordem (IM_3) não ultrapassa o piso de ruído. O parâmetro para avaliar a degeneração do sinal, devido a intermodulação de terceira ordem de dois sinais interferentes próximos, é chamado de “Terceiro Ponto de Intercepção” (IP_3 – *Third Intercept Point*). A medida é realizada através de um teste com duas frequências onde uma delas é ajustada para ter a potência bem baixa com relação à outra, de tal forma que os termos não lineares de ordem superior sejam desprezíveis e o ganho seja relativamente constante. Desenhado em um gráfico com escala logarítmica, a intensidade dos produtos de intermodulação crescem a uma taxa três vezes maior do que a taxa da componente principal. Assim, o ponto de intercepção de terceira ordem (IP_3 – *Third Order Intercept Point*) é definido como a intersecção entre a coordenada horizontal deste ponto chamada entrada IP_3 (IIP_3 - *Input* IP_3), e a coordenada vertical chamada saída IP_3 (OIP_3 - *Output* IP_3).

Assim, considerando todas as grandezas em dBm pode-se escrever que

$$P_{IIP3} = P_{in} + \frac{P_{out} - P_{IMout}}{2} \quad (5.7)$$

Onde P_{IMout} é a potência da componente IM_3 , na saída do dispositivo. Uma vez que $P_{out} = P_{in} + G$ e $P_{IMout} = P_{IMin} + G$, onde G é o ganho em dB, do dispositivo e P_{IMin} é o nível de entrada referenciado aos produtos de IM_3 , tem-se

$$P_{IIP3} = P_{in} + \frac{P_{in} - P_{IMin}}{2} = \frac{3 \cdot P_{in} - P_{IMin}}{2} \quad (5.8)$$

e assim,

$$P_{in} = \frac{2 \cdot P_{IIP3} - P_{IMin}}{3} \quad (5.9)$$

e o nível de entrada em que os produtos de IM se igualam ao piso de ruído é dado por

$$P_{inmax} = \frac{2 \cdot P_{IIP3} + F}{3} \quad (5.10)$$

onde

$$F = -174dBm + NF(dB) + 10 \cdot \log B(Hz) \quad (5.11)$$

A SFDR é a diferença em dB, entre P_{inmax} e P_{inmin} :

$$SFDR = \frac{2 \cdot P_{IIP3} + F}{3} - (F + SNR_{min}) = \frac{2 \cdot (P_{IIP3} - F)}{3} - SNR_{min} \quad (5.12)$$

(RAZAVI, 1998)

5.1.2 Ruído de Fase

Considerando que os canais são transmitidos em altas frequências, é necessário converter estes canais para uma frequência intermediária (FI) utilizada pelo circuito decodificador que receberá o fluxo de informação do sintonizador. A grande maioria dos sintonizadores utiliza misturadores que são controlados por um oscilador local (LO). A Figura 5.2 mostra um sintonizador de dupla conversão que utiliza dois misturadores.

Apesar da necessidade do oscilador local gerar uma frequência fixa ou “pura”, não é possível evitar que ele contenha além da frequência dominante desejada, um espectro de frequências indesejáveis. O ruído de fase é a potência relativa das frequências indesejáveis em relação à frequência desejável, e desta forma é medida em **dBc**, “decibéis em relação a portadora”, onde a portadora neste caso é a frequência desejada.

O ruído de fase se tornou um parâmetro muito importante com a digitalização dos sistemas de recepção devido a sua influência na recepção dos sinais modulados digitalmente. Em um sistema com modulação QAM⁹³, por exemplo, o sinal é dividido em símbolos, representados por ponto amostral com as informações de amplitude e fase, e assim para se conseguir uma alta taxa de símbolos, ou uma maior quantidade de bits por Hertz (eficiência espectral), é necessário que o ruído de fase seja o menor possível.

Figura 5.2 – Sintonizador de dupla conversão (NORSWORTHY, 2001)

Os efeitos do ruído de fase na recepção de um sinal analógico de TV têm pouca influência na qualidade da imagem, porém, no sinal digital de TV, se o ruído de fase não estiver abaixo de determinados limites pode não existir imagem na tela da TV. Os novos projetos de sintonizadores especificam níveis bem reduzidos para o ruído de fase.

5.1.3 Figura de Ruído

Os sintonizadores adicionam algum ruído ao sinal recebido, e a figura de ruído (NF⁹⁴) é uma medida da degradação da relação sinal-ruído após o sinal passar pelo sintonizador. Em

⁹³ QAM: *Quadrature Amplitude Modulation*.

⁹⁴ NF: *Noise Figure*.

outras palavras, a figura de ruído é a diferença em dB entre a relação sinal-ruído (SNR⁹⁵) na entrada e a relação sinal-ruído na saída do sintonizador. A figura de ruído é importante nas recepções terrestres porque define o nível mínimo detectável do sinal, ou seja, o sinal mais fraco possível de ser recebido. É também importante manter uma figura de ruído bem baixa, menor do que 7 dB, para os sistemas de recepção terrestre de sinais modulados digitalmente porque desta forma pode-se conseguir uma maior eficiência do sistema demodulador.

A natureza da figura de ruído está relacionada com o amplificador de entrada do sintonizador, que geralmente é chamado de amplificador de baixo ruído (LNA⁹⁶).

5.1.4 Resposta a Espúrios (Distorção)

Os produtos espúrios são sinais indesejados presentes na saída do sintonizador. A fonte destes sinais indesejados pode ser uma distorção inerente aos circuitos ativos do sintonizador ou um acoplamento indesejado entre um circuito e outro. Se o sintonizador for projetado adequadamente, o que significa que as condições de acoplamento estejam muito bem ajustadas, então a fonte mais provável dos produtos espúrios é a distorção. Nos sintonizadores, as fontes mais frequentemente discutidas são a distorção por intermodulação (IMD⁹⁷) e a modulação cruzada (*Cross Modulation*). Os produtos de distorções são geralmente introduzidos quando se opera com sinais de níveis mais elevados, como por exemplo, na radiodifusão terrestre de TV, onde um problema típico é receber sinais fracos na presença de sinais fortes.

A distorção é um grande problema nos sistemas de radiodifusão analógica porque uma quantidade muito grande de energia está concentrada no entorno das portadoras resultando picos muito intensos, e, além disso, a visão humana está desenvolvida para perceber determinados padrões de vídeo, nos quais uma pequena distorção já é perceptível. Em contraste, a energia nos sistemas de radiodifusão digital é distribuída ao longo do canal e a distorção não é perceptível até o ponto em que afeta a integridade dos bits transmitidos. A partir daí, o sinal é perdido e não se tem mais recepção. Para os sistemas analógicos é desejável ter todos os produtos espúrios em um nível de no mínimo 57 dB abaixo da portadora, ou -57 dBc. Para os sistemas digitais um nível mínimo de -50 dBc é desejável.

⁹⁵ SNR: Signal to Noise Ratio.

⁹⁶ LNA: Low Noise Amplifier.

⁹⁷ IMD: Intermodulation Distortion.

5.1.5 Rejeição a Frequência Imagem

O processo de sintonia translada os sinais na frequência. Tomando como exemplo a sintonia de um determinado canal que é transladado para uma frequência intermediária, FI, tem-se de forma análoga que um canal que esteja numa frequência duas vezes abaixo do valor desta FI, será transladado para uma frequência intermediária negativa $-FI$, ou seja, uma frequência com componente de fase negativa, e assim este canal poderá interferir no canal desejado, na frequência com componente de fase positiva, FI. Este canal interferente é chamado de “canal imagem” ou “frequência imagem” e deve ser rejeitado com uma grande margem de atenuação para não prejudicar a recepção.

A rejeição do canal imagem pode ser resolvida com filtros e misturadores projetados especialmente para esta aplicação. Nos sintonizadores com conversão simples, um filtro rejeita faixa é utilizado para rejeitar o canal imagem antes da translação de frequência.

O desempenho de um filtro deste tipo está limitado a faixa de 50 a 60 dB de rejeição na banda de UHF (470 MHz ~ 806 MHz), podendo-se obter desempenho melhores com sintonizadores de dupla conversão, onde o filtro da primeira FI pode suprimir o canal imagem com a atenuação desejada. Para se conseguir um custo mais baixo em sintonizadores de dupla conversão, é recomendado o uso de filtros de superfície acústica (SAW⁹⁸) na primeira FI para atingir níveis de 40 a 50 dB de atenuação, e complementarmente um misturador chamado “misturador de rejeição de imagem”, que pode acrescentar uma atenuação de 35 a 40 dB e assim, com a combinação de ambos, atingir níveis de rejeição da ordem de 70 a 90 dB.

Ao longo dos anos, as agências reguladoras do espectro de RF vêm adotando em seus países critérios para prevenir que não existam em uma determinada localidade transmissões de canais analógicos em canais imagem de canais existentes. Porém com o advento da transmissão digital e do aumento do número de emissoras de TV nas grandes cidades, novas técnicas estão sendo adotadas por não ser mais possível deixar canais vagos no espectro.

Desta forma, os sintonizadores necessitam ter um maior nível de rejeição a estes canais (~80 dB) para possibilitar uma recepção adequada e sem interferências.

5.2 O Legado dos Sintonizadores de TV

Nos sistemas de transmissão de TV terrestre, os canais são alocados um ao lado do outro, formando uma banda de frequências. Cada um destes canais, no Brasil, ocupa 6 MHz de largura de banda, sendo que a faixa de frequência alocada para o serviço de radiodifusão de

⁹⁸ SAW: Surface Acoustic Filter.

som e imagem, é de 54 MHz a 88 MHz (canais 2 a 6), VHF baixos, 174 MHz a 216 MHz (canais 7 a 13), VHF altos, e de 470 MHz a 806 MHz (canais 14 a 69), UHF. Para receber o canal desejado, o sintonizador seleciona dentre todos os canais existentes naquela faixa, o canal pretendido. A Figura 5.3 mostra o espectro dos canais de TV na banda de UHF, na cidade de São Paulo em 4 de abril de 2008.

Figura 5.3. Espectro dos canais de TV na banda de UHF em São Paulo em 04/04/2008

Pode-se notar na Figura 5.3 que a grande quantidade de canais existentes provoca um verdadeiro congestionamento espectral, ou seja, não existem mais espaços disponíveis para a alocação de novos canais. Outro ponto importante é que os canais digitais já começam a ocupar o seu espaço no espectro, ocupando os canais adjacentes, que não eram utilizados quando a transmissão era apenas analógica, pois estes canais funcionavam apenas como uma espécie de proteção entre os canais analógicos existentes.

Como já foi dito no capítulo 3, houve a necessidade de se criar um novo plano de canalização para acomodar os novos canais digitais de tal forma que pudessem conviver harmoniosamente e sem interferências, com os canais analógicos existentes e a existirem,

durante a fase de transição que deverá durar em torno de 15 a 20 anos, quando então o sinal analógico será completamente suprimido (*switch off*).

O sintonizador também deve ser ágil o suficiente para selecionar diferentes canais, um de cada vez, de acordo com a preferência do usuário. Cada canal transporta as informações referentes à programação daquele canal, e estas informações estão contidas no sinal modulado que é gerado na estação transmissora. O sintonizador, que está no receptor, não deve alterar a forma do sinal recebido, isto é, não deve degradá-lo e nem introduzir ruído no sistema, de tal forma que seja possível a obtenção das informações pelo processo de demodulação. Diversos métodos podem ser utilizados para selecionar o canal desejado, e resultam na filtragem dos canais indesejados, deixando passar apenas o canal desejado. Os elementos utilizados para realizar esta filtragem incluem componentes que alteram a frequência do canal (misturadores), amplificam o sinal e filtram o canal.

A Figura 5.4, mostra um diagrama de blocos de um sintonizador tradicional, ou “sintonizador convencional”, onde os ajustes são feitos manualmente durante o processo de fabricação do produto, através das bobinas e capacitores variáveis.

Figura 5.4 - O Legado dos Sintonizadores convencionais (SEGAL, 2005)

O circuito do misturador (*mixer oscillator*), no centro da figura, seleciona o canal desejado. Na entrada é possível identificar a chave seletora de banda e os filtros de entrada: UHF, VHF(*hi*) e VHF(*lo*). Estes tipos de filtros são chamados filtros pré-seletores

(*tracking filters*), e o seu uso possibilita a mudança de banda todas as vezes que se desejar, porém a largura de banda que se consegue obter é bastante limitada a uma pequena faixa de frequências. Devido a isto se torna necessário o uso de três diferentes filtros, com faixas distintas, para cobrir toda a faixa de TV e quando o canal é selecionado o sintonizador utiliza o processo de escolha e ajuste do filtro.

Os filtros pré-seletores precisam de ajustes durante o processo de fabricação, sendo que até recentemente, os funcionários da linha de produção é que faziam os ajustes destes filtros em cada peça produzida, tornando o processo moroso e caro. Mesmo hoje em dia com equipamentos robotizados estes ajustes ainda demandam um tempo significativo no processo de fabricação. Além destas dificuldades, devido ao baixo custo dos sintonizadores, os componentes utilizados nos filtros sintonizados não possuem uma boa estabilidade térmica e devido aos seus envelhecimentos, suas características podem se alterar ao longo da vida útil, o que pode causar uma variação nas especificações do sintonizador que saiu da linha de fabricação totalmente ajustado. Atualmente é imprescindível que os sintonizadores tenham uma grande estabilidade de suas características funcionais, tanto na repetibilidade quanto no envelhecimento do produto. Desta forma, é necessário o desenvolvimento de uma nova geração de sintonizadores, para atender a crescente demanda das novas tecnologias digitais.

A Figura 5.5 mostra um modelo de um “sintonizador convencional” com conversão simples. Na figura estão identificadas algumas bobinas, que são ajustadas durante o processo de fabricação. Estas bobinas fazem parte do sistema de filtros e neste exemplo, a bobina foi ajustada inserindo-se uma pequena chave de fenda plástica entre as espiras da bobina e espaçando-as até se atingir a especificação desejada. Este é um processo de mão de obra intensiva e que também consome muito tempo durante o processo de fabricação.

Figura 5.5 - O Sintonizador convencional

5.3 O Sintonizador-Demodulador

O sintonizador-demodulador pode ser descrito a partir do diagrama de blocos da Figura 5.6. (SEGAL, 2005)

Figura 5.6. Diagrama de blocos do módulo de sintonia e demodulação

O amplificador de baixo ruído recebe o sinal de RF que vem da antena e ajusta as variações de potência para garantir da melhor forma possível a uniformidade do nível de sinal entregue ao sintonizador. Esta variação do nível do sinal na entrada é chamada de faixa dinâmica. O sintonizador seleciona a frequência de interesse, ou seja, o canal desejado, excluindo os outros canais existentes na faixa e converte este canal para uma frequência intermediária (FI). Todos os canais sintonizados irão sempre ser entregues pelo sintonizador ao filtro, na mesma FI, que contém toda a informação do sinal que estava presente na entrada do sintonizador. É muito importante a manutenção das características originais do sinal para evitar erros na recuperação da informação transmitida. A saída do sintonizador é conectada ao filtro que tem por objetivo retirar toda a energia não necessária ao processo de conversão. Após o filtro, o sinal é conduzido ao amplificador de FI que ajusta o nível de potência desta frequência para a faixa dinâmica aceita pelo demodulador. Por fim, o demodulador irá receber o sinal modulado, na frequência intermediária e com o nível de potência suficiente para a sua entrada e assim promoverá o processo de demodulação, para entregar em sua saída um fluxo de bits (TS) contendo toda a informação do sinal original transmitido. Considerando a importância do estágio sintonizador para a qualidade da recepção dos sinais no Sistema Brasileiro de TV Digital, a seguir será apresentado com maiores detalhes o processo de recepção do sinal, sintonia e conversão.

5.3.1 O Misturador

A Figura 5.7 mostra o diagrama de blocos do misturador, o núcleo principal de um sintonizador, com as operações matemáticas que são realizadas por ele. O misturador gera dois sinais de saída em função de dois sinais de entrada, um sinal de RF e um sinal do oscilador local (LO). O sinal do oscilador local é uma forma de onda senoidal pura e limpa, enquanto que o sinal de entrada é um sinal modulado que carrega a informação.

Figura 5.7. O Misturador

O sinal na saída do misturador contém a mesma modulação que o sinal de RF da entrada, mas em uma nova frequência determinada pela soma ou diferença das frequências de RF e LO. As frequências dos sinais gerados são a soma e a diferença das frequências do sinal de entrada. Na maioria dos sintonizadores apenas um destes resultados é utilizado, e desta forma a modulação do sinal de entrada é transferida para a saída através da soma ou diferença das frequências.

5.3.2 O Sintonizador de Conversão Simples

A Figura 5.8 mostra um exemplo do funcionamento de um sintonizador de conversão simples. A frequência de RF da entrada é reduzida ou convertida para uma frequência intermediária (FI) mais baixa. O PLL de frequência variável do oscilador local (LO) permite que a sintonia seja feita na faixa desejada de acordo com o canal pretendido.

Neste exemplo, a frequência desejada é 503 MHz e a frequência de FI, na entrada do demodulador é de 44 MHz. O PLL é ajustado para 459 MHz de tal forma que a frequência de entrada, 503 MHz seja convertida para 44 MHz, neste caso utilizando a diferença entre as frequências. A soma destas frequências, 962 MHz, também está presente na saída do misturador, e deve ser removida por um filtro passa-baixas antes de atingir a entrada do demodulador. Este tipo de sintonizador, existente na maioria dos aparelhos de TV em uso atualmente e é denominado “sintonizador de simples conversão”, porque ele usa apenas um misturador e também porque a frequência de entrada é reduzida para uma frequência mais baixa.

Figura 5.8. Sintonizador de conversão simples

Transladar o sinal de RF de entrada (503 MHz) para uma frequência mais baixa (44 MHz) se chama conversão para baixo (*down conversion*) enquanto que utilizar uma frequência de PLL (459 MHz) abaixo da frequência do sinal de RF de entrada (503 MHz) se chama injeção de banda lateral inferior (*low side injection*).

5.3.3 A Frequência Imagem

Considerando a existência de um sinal de RF na frequência de 415 MHz, como mostra a Figura 5.9, o resultado da diferença do sinal de RF de entrada (415 MHz) pelo sinal do oscilador local (459 MHz), também será 44 MHz. Ambos os sinais de RF, 503 MHz e 415 MHz, resultam em uma FI de 44 MHz. Sendo assim, se existirem sinais presentes nestas duas frequências, o resultado será uma grande complicação para o demodulador. O sinal negativo no valor absoluto da equação indica que houve uma inversão do espectro.

Outra forma de observar o problema da frequência imagem é observar o espectro de frequências, como mostra a Figura 5.10, onde é possível observar que a frequência imagem está à mesma distância do oscilador local (LO), que o sinal de RF. O resultado também seria o mesmo se a injeção fosse feita pela banda lateral superior. Para evitar que a frequência imagem apareça na frequência de FI, na entrada do demodulador, é necessário realizar a operação de filtragem, antes do misturador. O filtro pré-seletor é um dos métodos utilizados

para remover o sinal da frequência imagem. Se a frequência imagem não for removida, ela causará inúmeros problemas ao demodulador e ao processo de recepção, haja vista a não possibilidade de removê-la após este estágio.

Figura 5.9. Frequência Imagem

Figura 5.10 - Espectro da frequência imagem

A Figura 5.11 mostra um diagrama do sintonizador de simples conversão com a inclusão de um filtro passa faixa para realizar a remoção da frequência imagem.

Figura 5.11 - O Filtro de frequência imagem

Neste exemplo, o filtro colocado antes do misturador permite passar apenas a faixa de 470 a 806 MHz. Nas aplicações práticas o uso do filtro é um pouco mais complexo, haja vista a grande quantidade de canais existentes no espectro de TV, e desta forma é necessário o uso de mais do que apenas um filtro o que eleva o sistema a ter uma instabilidade e também um custo mais elevado. Também é importante observar que em muitos casos a frequência imagem pode estar dentro da faixa de RF do sistema obrigando assim o filtro sintonizado a acompanhar uma faixa pré-determinada em conjunto com a frequência do PLL do oscilador local. Este modelo de filtro aumenta ainda mais a instabilidade e o custo do sistema. Em sintonizadores de banda muito larga, são utilizadas chaves eletrônicas para comutar entre diversos conjuntos de filtros com faixas pré-sintonizadas.

Se a frequência imagem pudesse ser transladada da banda de RF desejada para outra faixa de frequência diferente da banda de interesse, as exigências destes filtros poderiam ser menos críticas. Uma forma possível de transladar a frequência imagem da banda de RF desejada é escolher criteriosamente a frequência de FI e a frequência do oscilador local (LO). Esta escolha poderia acarretar em um custo maior em outras partes do sistema, porém os

problemas com a instabilidade e o uso de diversos filtros passa-faixa de entrada seriam resolvidos.

5.3.4 A Frequência Imagem com Conversão para Cima

Uma forma de reduzir as exigências do filtro de frequência imagem é transladar a frequência imagem para bem distante da frequência desejada. Isto pode ser feito utilizando-se uma conversão para cima (*up conversion*) onde a frequência desejada é convertida para uma frequência muito mais alta. Devido ao processo matemático, a frequência imagem ficará bem distante da banda de RF de interesse, e desta forma o filtro poderá ser simplesmente um filtro passa-baixas ao invés de um complexo grupo de filtros sintonizados.

Figura 5.12 - Misturador com conversão para cima

A Figura 5.12 mostra o circuito de um misturador que ao invés de converter a frequência desejada, 503 MHz, para a frequência de 44 MHz (FI), converte-a primeiro para uma nova frequência de FI mais alta, que neste exemplo será 1 GHz. Neste caso, o PLL está ajustado para a frequência de 1.503 MHz, o que significa que a diferença resultará na frequência de FI desejada (1 GHz = 1.503 – 503 MHz). Apesar desta “nova” FI ser uma frequência muito mais alta, e praticamente impossível de ser demodulada pelo sistema e a construção dos filtros de entrada ser mais simples, as exigências do demodulador ficaram mais críticas.

5.3.5 O Sintonizador de Dupla Conversão

O sintonizador de dupla conversão oferece um método muito eficiente para se trabalhar com as frequências imagens ao longo de uma banda de RF. Ele possibilita um amplo distanciamento da frequência imagem como mostrado no misturador com conversão para cima e também oferece uma frequência de FI possível de ser demodulada como no misturador de conversão para baixo. A Figura 5.13 mostra um diagrama de blocos deste tipo de conversão.

Figura 5.13: Sintonizador com dupla conversão

O primeiro misturador converte a frequência do sinal de RF de entrada, para uma frequência bem acima da frequência de RF mais alta do espectro de entrada desejado. A saída do primeiro misturador está sempre em uma frequência fixa, chamada de “Primeira FI”. Utilizando-se o primeiro oscilador local com uma frequência bem acima da mais alta frequência do espectro de RF de entrada, a frequência imagem ficará bem acima do espectro de RF de entrada. Isto significa que na maioria dos casos não haverá a necessidade de um filtro antes do primeiro misturador. Devido a primeira e a segunda FI serem fixas, a

frequência-imagem do segundo misturador também será fixa e assim, é possível remover a segunda frequência imagem através de um filtro passa faixa.

As dificuldades com este tipo de sintonizador são que o primeiro misturador e o primeiro oscilador local estão em uma frequência bem acima do espectro de RF de entrada, e desta forma determinam o desempenho do sistema. Porém com as novas tecnologias existentes atualmente nos processos CMOS, já é possível atender estas exigências de uma forma muito satisfatória em termos de custo e aplicações de banda larga. Em um sintonizador com dupla conversão, a primeira FI está em uma frequência alta e o segundo misturador, abaixa a frequência novamente para a uma faixa de frequência onde a demodulação é mais simples. Este método de conversão reduz significativamente o uso de filtros nos sintonizadores de RF, aumentando muito o desempenho de todo o sistema.

5.3.6 A Sintonia dos Canais de TV

Para sintonizar um canal de TV utilizando-se um sintonizador de dupla conversão primeiramente é necessário escolher o canal que se deseja sintonizar e a frequência de FI que se deseja utilizar para o demodulador. Considerando o exemplo da Figura 5.14, o canal escolhido tem uma frequência de 533 MHz, a frequência de FI é 44 MHz, e a frequência escolhida para a primeira FI é de 1.200 MHz. É necessário escolher também as frequências para os osciladores locais (LO1 e LO2). Para converter o sinal de 533 MHz para 1.200 MHz deve ser usado um LO na frequência de 1.733 MHz, considerando-se a utilização da diferença dos sinais na saída do misturador. Na sequência, esta primeira FI precisa ser convertida para a segunda FI, ou a FI de saída desejada, ou seja, 44 MHz. Para obter este resultado é utilizado um LO de 1.156 MHz para a frequência do segundo PLL. Considerando que a primeira FI é sempre 1.200 MHz, a frequência do segundo LO não muda em função dos diferentes canais sintonizados na entrada, e, portanto a sintonia é acompanhada pela mudança apenas do primeiro LO.

Figura 5.14 - Sintonia de um canal de TV

Em um sintonizador de dupla conversão existem duas frequências imagens, uma para o primeiro misturador e outra para o segundo misturador. As frequências imagens são diferentes dependendo da parte de RF do sistema e sendo assim, existem duas frequências imagens na entrada do sintonizador.

No exemplo da Figura 5.15, pode-se verificar o cálculo da frequência imagem para o primeiro misturador, o resultado é 2.933 MHz. A diferença de frequências na saída do primeiro misturador é

$$\text{Misturador 1a} = 1.733 - 533 \text{ MHz} = 1.200 \text{ MHz}$$

Porém, a frequência imagem do primeiro misturador também resulta em uma saída de 1.200 MHz uma vez que

$$\text{Misturador 1b} = 2.933 - 1.733 \text{ MHz} = 1.200 \text{ MHz}$$

Como esta frequência (2.933 MHz) é bastante elevada para a faixa de TV (470 – 806 MHz), a energia contida nela pode ser desprezada e não há necessidade de filtros na entrada do sintonizador para eliminá-la.

Figura 5.15 - Frequências imagens na dupla conversão

A Figura 5.15 também mostra o cálculo da frequência imagem do segundo misturador, que é 1.112 MHz. Seguindo os mesmos procedimentos do cálculo anterior é possível verificar que a saída do segundo misturador resulta em

$$\text{Misturador 2a} = 1.200 - 1.156 \text{ MHz} = 44 \text{ MHz}$$

Aqui também a frequência imagem do segundo misturador, 1.112 MHz, provocará na saída do segundo misturador uma saída idêntica a anterior, ou seja,

$$\text{Misturador 2b} = 1.156 - 1.112 \text{ MHz} = 44 \text{ MHz}$$

Ambas as entradas para o segundo misturador, 1.112 MHz e 1.200 MHz resultam em uma FI de 44 MHz na sua saída. Neste caso, é necessário considerar a energia presente na frequência imagem de 1.112 MHz e prevenir que ela não atinja o segundo misturador. A única forma de esta energia atingir a entrada do segundo misturador é ela estar presente na saída do primeiro misturador como mostra a Figura 5.16.

Para que a frequência de 1.112 MHz atinja a entrada do segundo misturador, o primeiro misturador deve ter feito a conversão para cima, da frequência presente na sua entrada. Considerando que a saída do misturador é o sinal de RF na sua entrada menos o sinal do LO, pode-se calcular a frequência de entrada para uma determinada saída desejada

considerando a frequência do LO menos a frequência de saída desejada. Neste exemplo, o primeiro LO tem uma frequência de 1.733 MHz, então o resultado será

$$\text{Frequência de Entrada} = 1.733 - 1.112 \text{ MHz} = 621 \text{ MHz}$$

Isto significa que se não houver filtros na entrada do primeiro misturador, a energia existente na frequência de 621 MHz será convertida para 1.112 MHz (para cima).

Figura 5.16 - Filtro da frequência imagem

Considerando que 1.112 MHz é a frequência imagem do segundo misturador, a frequência de 621 MHz na entrada do sintonizador é a frequência imagem do segundo misturador. A vantagem do sintonizador de dupla conversão é que o segundo LO tem uma frequência fixa, o que significa que a frequência imagem também será fixa, ou seja, 1.112 MHz. Em um sistema de banda larga, como a banda de UHF, existe uma grande probabilidade de existir energia na frequência de 621 MHz, pois existem muitos canais no espectro, também é certo que a primeira conversão para cima resultará na frequência imagem de 1.112 MHz. Assim é necessário o uso de um filtro passa-faixa entre os misturadores para remover esta energia como mostrado na Figura 5.14. Outra vantagem do sintonizador de dupla conversão é que o segundo LO tem frequência fixa, o que significa que sua frequência imagem também é fixa. Assim, o filtro para remover a frequência imagem também é um

componente de frequência fixa, não necessitando dos filtros sintonizados. O filtro entre os misturadores acompanha a mesma função que é feita pelos filtros sintonizados na entrada dos sintonizadores de conversão simples e o filtro passa-faixa necessita ter apenas uma largura de banda suficiente para deixar passar o sinal de interesse, no caso dos canais de TV, 6 MHz.

O sintonizador de dupla conversão permite que uma banda larga de frequências de entrada possa ser selecionada sem o uso dos filtros sintonizados e utilizando apenas um filtro passa-faixa simples entre os misturadores. Com o avanço da tecnologia de fabricação de semicondutores foi possível o desenvolvimento de filtros específicos para esta aplicação e os filtros passa-faixa utilizados nos sintonizadores de dupla conversão são os chamados filtros SAW⁹⁹, que possuem um fator de forma muito mais abrupto nas frequências de corte permitindo ao sintonizador ter uma maior rejeição aos canais adjacentes. Com o advento dos processos de silício que suportam a alta frequência da primeira FI, é possível construir sintonizadores de dupla conversão com custos muito competitivos e em muitos casos até a integração dos mesmos em circuitos demoduladores.

5.4 O Sintonizador de Silício

Os sintonizadores de silício oferecem grandes vantagens em relação aos sintonizadores tradicionais e irão substituir muito em breve os sintonizadores de convencionais da mesma forma como os transistores substituíram as válvulas (WONG, et al., 2005).

Os sintonizadores de silício são sintonizadores de RF desenvolvidos no formato de um circuito integrado (*chip*) com tecnologia avançada e com larga escala de integração, sendo também chamados de “*chip tuner*”. São mais simples de serem produzidos, não necessitam de ajustes e podem ser encontrados em tamanho muito reduzido, comparados com os sintonizadores convencionais, permitindo uma redução do tamanho e do custo dos produtos que os utilizam, podendo também ser utilizados em projetos de receptores de TV em qualquer padrão de transmissão existente no mundo. Algumas outras vantagens dos sintonizadores de silício em relação aos sintonizadores convencionais são: a) possibilidade de integrar a recepção analógica e digital em um só dispositivo; b) possibilidade de fabricar um dispositivo com múltiplos sintonizadores para funções como PIP¹⁰⁰, PVR¹⁰¹ e outras; c) maior vida útil do dispositivo com um número de falhas bastante reduzido; d) melhor estabilidade térmica do que os sintonizadores convencionais; e) aprovado em padrões de qualidade bastante rígidos; f)

⁹⁹ SAW: *Surface Acoustic Filter*.

¹⁰⁰ PIP: *Picture in picture*.

¹⁰¹ PVR: *Personal Video Recorder*.

sintonia rápida de canais, da ordem de 5 ms, enquanto que nos modelos tradicionais, da ordem de 150 ms. O sintonizador de silício mantém a retro-compatibilidade com o legado dos sistemas analógicos existentes e permite também o uso simultâneo nos novos sistemas digitais, permitindo assim uma transição suave da TV analógica para a TV digital. As técnicas mais recentes utilizadas nos projetos dos sintonizadores de silício incluem os processos BiCMOS¹⁰², transistores de silício-germânio (SiGe) e tecnologias da ordem de $0,18\mu$. Estes desenvolvimentos aliados a necessidade de um melhor e mais eficiente uso do espectro radioelétrico permitirão uma adoção rápida dos sintonizadores de silício.

As Figuras 5.17 e 5.18 mostram dois sintonizadores utilizando sintonizadores de silício.

Figura 5.17. Sintonizador de silício (NXP, BV)

Figura 5.18. Sintonizador de silício (VALENTINE, 2006)

¹⁰² BiCMOS: *Bipolar junction transistors and CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor)*.

Um exemplo de um sintonizador de silício é o circuito integrado MT2131, da Microtune, mostrado no diagrama de blocos na Figura 5.19.

Figura 5.19. Sintonizador de silício MT2131 (MICROTUNE INC., 2005)

Este sintonizador é de dupla conversão e tem uma faixa de entrada de RF de 48 MHz a 1.000 MHz. Suas principais características são: LNA de alta sensibilidade integrado no chip, atenuadores de RF programáveis, primeira FI fora da faixa de TV (1.220 MHz), filtros pré-seletores integrados no chip, filtros de rejeição da frequência imagem, controle automático de ganho programável, PLL integrado no chip, VCO¹⁰³s e varactores para gerar as frequências LO1 e LO2¹⁰⁴ integrados no chip, controle automático de frequência integrado no chip, todas as funções programáveis através do barramento I2C, necessita de poucos componentes externos para operação, não tem partes móveis e não necessita de ajustes durante o processo de produção, frequência de FI ajustada para ISDB-T_B (44 MHz), e tamanho reduzido (7 mm x 7 mm).

Dentre seis fabricantes de sintonizadores de silício pesquisados e avaliados, o MT2131 da Microtune foi o que apresentou o melhor desempenho para o ISDB-T_B, e por esta razão, foi escolhido para o projeto. A Figura 5.20 mostra o resultado dos testes de sensibilidade, a Figura 5.21 mostra os resultados dos testes de rejeição à frequência imagem, a Figura 5.22 mostra os resultados dos testes de ICA¹⁰⁵ N-1 e ICA N+1, e a Figura 5.23 mostra os resultados dos testes da Figura de Ruído.

¹⁰³ VCO: Voltage Controlled Oscillator.

¹⁰⁴ LO1 e LO2: Local Oscillator 1 e 2.

¹⁰⁵ ICA: Interferência de Canal Adjacente.

Figura 5.20. MT2131: Sensibilidade (MICROTUNE INC., 2005)

Figura 5.21. MT2131: Rejeição a frequência imagem (MICROTUNE INC., 2005)

Figura 5.22. MT2131: Rejeição a ICA (MICROTUNE INC., 2005)

Figura 5.23. MT2131: Figura de Ruído (MICROTUNE INC., 2005)

5.5 O Demodulador ISDB-T_B

A função do demodulador é extrair as informações contidas no sinal de RF recebido em banda base. Neste caso, o sinal foi convertido do canal sintonizado para a FI de 44 MHz, no sintonizador de silício. O primeiro estágio existente na entrada do demodulador é o conversor analógico-digital (ADC¹⁰⁶) que irá converter o sinal da FI em um fluxo de bits para então ser demodulado e entregue na sua saída para o circuito decodificador. Todo o processo após o conversor ADC é digital. Devido ao padrão de modulação adotado no Brasil não existem muitos fabricante de circuitos integrados demoduladores, apenas os japoneses Toshiba, Panasonic e Megachips, até o momento. O demodulador Toshiba TC90A87 foi o escolhido para o projeto por ser um chip muito utilizado no Japão atualmente e por já estar em uma geração mais avançada. A Figura 5.24 mostra o diagrama de blocos do demodulador TC90A87. Este circuito integrado é um demodulador OFDM com corretor de erros, utilizado para receber sinais de radiodifusão terrestre no padrão ISDB-T. O circuito integrado possibilita a entrada do sinal de RF em FI, tem um conversor ADC na sua entrada e realiza todo o processo de demodulação OFDM, decodificação do canal de transmissão e entrega a saída no protocolo MPEG-2 TS. O circuito integrado suporta os três modos de transmissão do ISDB-T_B, as quatro configurações de intervalo de guarda no sistema de transmissão e demodula e decodifica todos os parâmetros do sinal transmitido especificados pela TMCC, incluindo a transmissão hierárquica. As características deste circuito integrado são: suporta a transmissão hierárquica OFDM; suporta os modos 2k, 4k e 8k; suporta as três camadas de transmissão incluindo 1Seg; suporta todos os modos de “*de-interleaving*”¹⁰⁷; saída em MPEG-2 TS; detecta o modo de transmissão automaticamente; possui circuito para suprimir interferência de co-canal (ICC); possui um conversor ADC; possui detecção I/Q digital e circuito de AFC¹⁰⁸; decodifica os parâmetros da TMCC; possui saída para medir a taxa de erro; possui monitor da constelação; saída em banda base (4 MHz) ou em FI (44 MHz); todos os parâmetros do circuito integrado são controlados via barramento I²C (TOSHIBA CORPORATION, 2006)

¹⁰⁶ ADC: *Analog to Digital Converter*.

¹⁰⁷ *De-interleaving*: Desentrelaçamento temporal.

¹⁰⁸ AFC: *Automatic Frequency Control*.

Figura 5.24. TC90A87: Diagrama de blocos do demodulador (TOSHIBA CORPORATION, 2006)

5.6 O Projeto do Sintonizador-Demodulador para o ISDB-T_B

Considerando:

- Os resultados das medidas de campo do sinal analógico;
- Os testes comparativos realizados entre os sistemas de transmissão de TV Digital terrestre entre 2000 e 2005;
- O sistema de TV digital adotado no Brasil;
- O congestionamento espectral existentes nas grandes regiões metropolitanas do Brasil;
- O grande número de domicílios residenciais que só recebem o sinal de TV aberta via transmissão terrestre;
- O grande número de canais geradores e retransmissores de TV;
- O grande número de lares que recebem o sinal de TV digital com baixa qualidade da imagem;
- As imperfeições existentes no canal de transmissão;
- A morfologia do terreno e o adensamento populacional nas grandes regiões metropolitanas do Brasil;

- j) As normas técnicas elaboradas pela ANATEL para atender o sistema de transmissão do SBTVD;
- k) A necessidade de oferecer aos fabricantes brasileiros de receptores de TV uma solução que atenda as especificações do Sistema Brasileiro de TV Digital e ao mesmo tempo minimize ou mesmo solucione muitos dos problemas apresentados.

Decidiu-se apresentar uma proposta de um modelo de sintonizador-demodulador utilizando os circuitos integrados MT2131 e TC90A87, como mostrado na Figura 5.25.

Figura 5.25. Diagrama de blocos do sintonizador-demodulador

O projeto foi desenvolvido levando-se em consideração as necessidades identificadas, a inovação tecnológica, haja vista a não existência de nenhum fabricante deste tipo de componente no Brasil, o ineditismo de existir um desenvolvimento local que possa ser utilizado em larga escala na produção de televisores, receptores de TV digital, placas para computadores, enfim, em uma diversidade de equipamentos do complexo eletrônico que recebam sinais de TV digital. Com o objetivo de identificar o projeto e caracterizá-lo para referências futuras foi dado o nome de “MackNim¹⁰⁹” ao sintonizador-demodulador. A Figura 5.26 mostra o esquema elétrico do protótipo desenvolvido e a Figura 5.27 mostra o projeto da placa de circuito impresso e o MackNim montado em um gabinete metálico.

¹⁰⁹ MackNim: Abreviatura criada a partir de Mackenzie e *Network Interface Module*.

Figura 5.26. Esquema elétrico do MackNim

Figura 5.27. Projeto do MackNim, sintonizador-demodulador

Para permitir o funcionamento e teste do MackNim, também foi desenvolvida uma placa de referência, mostrada na Figura 5.28, controlada por um PC sendo possível acessar todas as suas funcionalidade, programá-lo, mudar de canal, realizar as leituras necessárias e acessar o fluxo de bits na saída em padrão MPEG-2 TS. A partir da saída da placa de referência pode-se conectá-la a um analisador de TS para obter as informações desejadas do sinal recebido na entrada de RF.

Figura 5.28. Placa de referência para controlar o MackNim com o PC.

A Figura 5.29 mostra a tela do PC recebendo as informações do MackNim, sintonizado no canal 18 UHF, na portadora 2.784, e modulação 64QAM. O *software* foi desenvolvido pelo prof. Guido Stolfi para o projeto e permite acessar as informações de cada uma das portadoras OFDM recebidas. Na tela é possível ver a constelação da modulação da portadora escolhida. Esta ferramenta é muito útil, pois com ela é possível verificar a integridade do sinal que está sendo recebido, e é também possível avaliar a qualidade da modulação através do MER¹¹⁰.

Figura 5.29. Software utilizado para controlar a placa de referência do MackNim.

5.7 Testes de Laboratório do MackNim

Para que as devidas avaliações fossem feitas no protótipo desenvolvido foram realizados testes de laboratório do MackNim. O sintonizador-demodulador foi submetido aos testes considerando sempre que as condições de contorno em que ele deva estar inserido são do SBTVD, como mostra a Figura 5.30.

¹¹⁰ MER: *Modulation Error Rate*.

Figura 5.30. Pilha do SBTVD: Condições de contorno

Os testes foram realizados no laboratório de TV digital do Mackenzie, dentro da “Gaiola de Faraday”, como mostra a Figura 5.31.

Figura 5.31. Testes de Laboratório do MackNim.

5.7.1 Faixa Dinâmica

A Figura 5.32 mostra o resultado dos testes da Faixa Dinâmica (nível mínimo de recepção e nível máximo de recepção) do MackNim.

Figura 5.32. Faixa Dinâmica

A norma NBR 15.604 item 7.2.5, especifica como limite inferior o nível desejado igual a -77 dBm ou menor, e como limite superior o nível mínimo desejado igual a -20 dBm ou maior.

5.7.2 Rejeição a Interferências de Canais Adjacentes

Os gráficos abaixo mostram os resultados dos testes de interferências dos canais adjacentes. A Figura 5.33, mostra a interferência ICA N-1 do canal analógico no digital; a Figura 5.34 mostra a interferência ICA N+1 do canal analógico no digital; e a Figura 5.35 mostra os limites especificados pela norma NBR 15.604 para as proteções de interferências de canais adjacentes e interferências de co-canais, analógicos no digital.

MackNim

Figura 5.33. ICA N-1 analógico no digital

MackNim

Figura 5.34. ICA N+1 analógico no digital

Relações de Proteção Analógico no Digital NBR 15.604

Interferências de Co-Canal e Canal Adjacente

Canal Desejado (D) = Digital

Canal Interferente (U) = Analógico

Relação de Proteção (dB) = DdB - UdB

Figura 5.35. Relações de proteção UHF analógico no digital (ABNT NBR 15604)

A Figura 5.36, mostra os limites especificados pela norma NBR 15.604 para as proteções de interferências de canais adjacentes e interferências de co-canais, digitais no digital. A Figura 5.37 mostra a interferência ICAN-1 do canal digital no digital; e a Figura 5.38 mostra a interferência ICAN+1 do canal digital no digital.

Relações de Proteção Digital no Digital NBR 15.604

Interferências de Co-Canal e Canal Adjacente

Canal Desejado (D) = Digital

Canal Interferente (U) = Digital

Relação de Proteção (dB) = DdB - UdB

Figura 5.36. Relações de proteção UHF digital no digital (ABNT NBR 15604)

MackNIM

Figura 5.37. ICA N-1 digital no digital

MackNIM

Figura 5.38. ICA N+1 digital no digital

5.7.3 Rejeição a Interferência de Co-Canal

Os testes de laboratório mostraram os resultados abaixo para as interferências de co-canal:

- a) Canal analógico no digital: **+6,1 dB** (a norma NBR 15.604 especifica o valor de +18 dB como o máximo limite aceitável. Nesta medida, quanto menor for o valor, mais robusto é o receptor);
- b) Canal digital no digital: **+17,7 dB** (a norma NBR 15.604 especifica o valor de +24 dB como o máximo limite aceitável. Nesta medida, quanto menor for o valor, mais robusto é o receptor).

5.8 Testes de Campo com o MackNim

Da mesma forma como foram feitos os testes das transmissões analógicas em 2004, montou-se uma nova campanha de testes com o objetivo de medir o sinal digital de seis emissoras na cidade de São Paulo: SBT, TV Globo, TV Record, Rede TV, TV Gazeta e Bandeirantes. Apesar de existirem nove emissoras no ar em São Paulo, com transmissões digitais, apenas estas seis estão operando em regime de potência plena, ou seja, já atendem a área de cobertura autorizada pela ANATEL para o sinal digital.

Considerando as localizações dos *clusters* e das torres de transmissão, foi definido como ponto central da campanha de medidas o cruzamento da Av. Paulista com a Rua da Consolação, conforme mostra a Figura 5.39, e a partir do qual foram traçadas radiais a cada 15 graus, e realizadas as medidas a 5km, 10km, 20km e 30km. A Figura 5.40 mostra o mapa da região metropolitana da cidade de São Paulo e os pontos onde as medidas foram realizadas.

Foram registradas as seguintes informações para cada um dos canais de TV:

- a) Nível do sinal em $\text{dB}\mu\text{V/m}$ e dBm ;
- b) Relação S/N;
- c) Qualidade da imagem conforme ITU-R BT 500-11;
- d) Características do sinal recebido.

A norma ITU-R BT.500-11 caracteriza o procedimento para a análise subjetiva da qualidade de vídeo através da comparação entre cinco tipos de imagens de referência, com diferentes graus de interferência, como foi mostrado no capítulo 2, porém, nas transmissões digitais de TV, ou se tem a imagem ou não. Neste caso adotou-se o seguinte critério:

- a) Classificação 5 para os pontos em que têm imagem na tela da TV;

- b) Classificação 3 para os pontos onde a imagem na tela da TV é intermitente, ou seja, está muito no limiar da recepção;
- c) Classificação 0 para os pontos em que não têm imagem na tela da TV.

Figura 5.39. Clusters e ponto central da campanha de testes

Figura 5.40. Pontos onde foram realizadas as medidas na região metropolitana de São Paulo

A campanha de campo produziu resultados em 108 pontos, sendo que em cada ponto foram coletadas as medidas de cada uma das emissoras. No total foram analisadas 648 imagens nos pontos de medição.

Para a realização destes testes foi instalado dentro da unidade móvel de medidas o conjunto MackNim e a placa de referência, conectada a um decodificador H.264 com saída em HDMI¹¹¹ e vídeo componente nos quais eram analisadas as medidas realizadas. Todas as medidas foram realizadas com o uso do protótipo do sintonizador-demodulador (MackNim) e os gráficos apresentados a seguir mostram o desempenho do MackNim no campo.

A Figura 5.41 mostra o resultado do SBT, canal 28; a Figura 5.42 mostra o resultado da TV Globo, canal 18; a Figura 5.43 mostra o resultado da TV Record, canal 20; a Figura 5.44 mostra o resultado da Rede TV, canal 29; a Figura 5.45 mostra o resultado da TV Gazeta, canal 17; e a Figura 5.46 mostra o resultado da TV Bandeirantes, canal 23.

Figura 5.41. SBT canal 28 digital, medidas de campo

¹¹¹ HDMI: *High Definition Multimedia Interface*.

TV Globo Digital

Qualidade da Imagem

ITU-R BT 500-11

2008

Figura 5.42. TV Globo, canal 18 digital, medidas de campo

TV Record Digital

Qualidade da Imagem

ITU-R BT 500-11

2008

Figura 5.43. TV Record, canal 20 digital, medidas de campo

Rede TV Digital

Qualidade da Imagem

ITU-R BT 500-11

2008

Figura 5.44. Rede TV, canal 29 digital, medidas de campo

TV Gazeta Digital

Qualidade da Imagem

ITU-R BT 500-11

2008

Figura 5.45. TV Gazeta, canal 17 digital, medidas de campo

2008

Figura 5.46. TV Bandeirantes, canal 23 digital, medidas de campo

Analisando os resultados de cada um dos gráficos apresentados foi possível compor uma média da qualidade subjetiva da imagem na área da campanha de testes, ou seja, na região metropolitana de São Paulo. Os dados da Tabela 5.1 apresentam os resultados da campanha de testes. É possível observar que **77,32%** dos pontos medidos apresentam uma qualidade de imagem com classificação 5. Em **1,7%** dos pontos, a imagem ficou intermitente, e em **20,98%** dos pontos medidos não havia imagem na tela do televisor.

Tabela 5.1 Resumo dos pontos medidos e a classificação ITU

Região Metropolitana de São Paulo				
Classificação ITU-R BT.500-11	Qualidade	Interferência	Nº de Pontos	% do Nº de Pontos
5	Tem Imagem	Não tem	501	77,32%
3	Imagem Intermitente	Incomoda	11	1,70%
0	Não tem Imagem	Não sensibiliza o receptor	136	20,98%
Total de Pontos			648	100%

Pode-se também analisar o resultado da campanha de testes, pelos contornos em que as medidas foram realizadas. A Tabela 5.2 mostra os resultados das medidas para o contorno

de 5 km, a Tabela 5.3 para o contorno de 10 km, a Tabela 5.4 para o contorno de 20 km e a Tabela 5.5 para o contorno de 30 km.

Tabela 5.2 Resumo dos pontos medidos para o contorno de 5 km e a classificação ITU

Região Metropolitana de São Paulo 5 km				
Classificação ITU-R BT.500-11	Qualidade	Interferência	Nº de Pontos	% do Nº de Pontos
5	Tem Imagem	Não tem	209	96,76%
3	Imagem Intermitente	Incomoda	0	0%
0	Não tem Imagem	Não sensibiliza o receptor	7	3,24%
Total de Pontos			216	100%

Tabela 5.3 Resumo dos pontos medidos para o contorno de 10 km e a classificação ITU

Região Metropolitana de São Paulo 10 km				
Classificação ITU-R BT.500-11	Qualidade	Interferência	Nº de Pontos	% do Nº de Pontos
5	Tem Imagem	Não tem	136	94,44%
3	Imagem Intermitente	Incomoda	1	0,69%
0	Não tem Imagem	Não sensibiliza o receptor	7	4,87%
Total de Pontos			144	100%

Tabela 5.4 Resumo dos pontos medidos para o contorno de 20 km e a classificação ITU

Região Metropolitana de São Paulo 20 km				
Classificação ITU-R BT.500-11	Qualidade	Interferência	Nº de Pontos	% do Nº de Pontos
5	Tem Imagem	Não tem	83	57,64%
3	Imagem Intermitente	Incomoda	4	2,78%
0	Não tem Imagem	Não sensibiliza o receptor	57	39,58%
Total de Pontos			144	100%

Tabela 5.5 Resumo dos pontos medidos para o contorno de 30 km e a classificação ITU

Região Metropolitana de São Paulo 30 km				
Classificação ITU-R BT.500-11	Qualidade	Interferência	Nº de Pontos	% do Nº de Pontos
5	Tem Imagem	Não tem	73	50,69%
3	Imagem Intermitente	Incomoda	6	4,17%
0	Não tem Imagem	Não sensibiliza o receptor	65	45,14%
Total de Pontos			144	100%

5.9 Conclusão do Capítulo

Este capítulo apresentou as pesquisas que foram realizadas para se construir um modelo de sintonizador-demodulador para o Sistema Brasileiro de TV Digital, o projeto, testes de laboratório e testes de campo com um protótipo do componente que foi “batizado” de MackNim. Deve-se considerar também a contribuição inédita apresentada relacionada às medidas de campo das transmissões digitais na cidade de São Paulo. É um momento histórico que se vive, haja vista a transição do sistema analógico para digital. Estes resultados são muito importantes e são de grande relevância para implantação do Sistema Brasileiro de TV Digital em todo o país e também servirem de referência para outros países que ainda não adotaram o seu sistema de TV Digital. Os resultados apresentados mostram que o projeto é viável e que além da robustez existente no padrão de transmissão de TV digital adotado no Brasil, é muito importante que os receptores tenham um sintonizador-demodulador que atenda as necessidades do SBTVD e possua um bom desempenho no campo para que a qualidade do serviço seja muito alta, dentro da área de cobertura do sinal digital.

6 Conclusões

Esta tese apresentou uma proposta de um sintonizador-demodulador para o Sistema Brasileiro de TV Digital, mostrando a concepção do projeto, a confecção do protótipo, os testes de laboratório e os testes de campo.

6.1 Resultados da Tese

Com o objetivo do desenvolvimento de um projeto que pudesse ser utilizado no futuro por empresas no Brasil como um componente de aparelhos receptores de TV digital, unidades conversoras de sinal de TV digital para sinal de TV analógico, placas para serem instaladas dentro de computadores ou até mesmo outros dispositivos do complexo eletrônico, foi feita uma pesquisa a respeito da qualidade do sinal e da imagem das transmissões analógicas que foi apresentada no Capítulo 2, mostrando a história da TV digital no Brasil desde 1998 até os dias atuais, o contexto no qual o Brasil está inserido em termos de canalização de TV e do uso da TV aberta pela maioria da população brasileira. Foi apresentado também o legado das transmissões analógicas, as dificuldades para a transição digital e de uma forma inédita o registro da campanha de testes das medidas do sinal analógico das transmissões de TV, que foi realizada em 2004. O resultado desta campanha de testes permitiu a identificação dos problemas existentes nas grandes regiões metropolitanas relacionados à qualidade da transmissão analógica e a propagação do sinal e a elaboração de um projeto robusto para a transmissão digital.

O Capítulo 3 apresentou o estado da arte dos padrões de transmissão dos sistemas de TV digital no mundo, inclusive com informações importantes e recentes a respeito do modelo chinês de TV digital. Mostrou também as características que deverão ser consideradas na digitalização das transmissões de TV no Brasil, destacando as interferências de co-canal (ICC), interferências de canal adjacente (ICA) e Faixa dinâmica. Apresentou as máscaras de transmissão que deverão ser utilizadas pelos sistemas de transmissão e as relações de proteção determinadas pela ANATEL para o plano de canalização de TV digital no Brasil.

O Capítulo 4 fez um breve relato do Sistema Brasileiro de TV Digital, apresentando as sete normas que o compõe e uma explicação sobre cada uma delas, com ênfase na NBR 15.601, relacionada a transmissão e a NBR 15.604, relacionada a recepção.

O Capítulo 5 apresentou as pesquisas, estudos, relatórios, testes de laboratório e testes de campo que foram utilizados para a proposta de um modelo de sintonizador-demodulador para o SBTVD. Caracterizou o modelo de desempenho que buscou com base em cinco pontos fundamentais para o projeto: faixa dinâmica, baixa distorção, baixa figura de ruído, baixo ruído de fase e alta rejeição a frequência imagem. Apresentou uma foto inédita do espectro dos canais de UHF na cidade de São Paulo, do dia 04/04/2008, que é importante para mostrar o congestionamento espectral existente na cidade e também os canais digitais que já se encontram no ar. Apresentou também o legado dos sintonizadores convencionais e os problemas existentes com a sua fabricação e uso nos aparelhos de TV. Caracterizou uma proposta de um sintonizador com dupla conversão, utilizando um “sintonizador de silício (*silicon tuner*)”, e apresentou a proposta do demodulador a ser utilizado no projeto e os circuitos integrados escolhidos para o projeto. Também foi apresentado o projeto do sintonizador-demodulador, o nome escolhido para o componente (MackNim), os testes de laboratório realizados, e a campanha de testes das medidas do sinal digital de TV utilizando a proposta apresentada. Os resultados das medidas do campo foram muito importantes para comprovar a proposta apresentada. Considerando as medidas do sinal analógico apresentadas no capítulo 2, pode-se verificar que nos mesmos contornos (5 km, 10 km, 20 km e 30 km) os resultados das medidas digitais foram muito superiores às analógicas. É importante lembrar que os sistemas analógicos já estão em operação há muitas décadas e os problemas relacionados à qualidade de transmissão do sinal não foram possíveis de serem solucionados até o momento. Em contrapartida, os sistemas digitais estão em operação há apenas seis meses e já apresentam uma qualidade de robustez muito superior ao analógico quando combinados com o uso do MackNim. Observando os resultados, tem-se no contorno de 5 km, 96,76% dos pontos com recepção do sinal, no contorno de 10 km, 94,44% dos pontos com recepção do sinal, no contorno de 20 km, 57,64% dos pontos com recepção do sinal e no contorno de 30 km, 50,69% dos pontos com recepção do sinal. Se considerarmos que o sistema analógico possui apenas 11,86% de todos os pontos, na mesma área de cobertura do digital, com uma recepção comparável a da TV digital é fundamental o registro do sucesso da implantação da TV digital no Brasil, mesmo de uma forma tão prematura, porque ainda será melhorada a área de cobertura, com o uso de reforçadores de sinais (*gap fillers*) em áreas de sombra e de baixa intensidade do sinal. Este procedimento, de reforçar o sinal no mesmo canal e dentro da mesma área não é possível nos sistemas analógicos, porém com o uso da modulação adotada pelo SBTVD esta tecnologia poderá ser utilizada.

A contribuição desta tese é muito importante para a continuidade da implantação da TV digital no Brasil, para aqueles países que ainda não tomaram a sua decisão por um sistema de TV digital, para os fabricantes de produtos relacionados a TV digital que poderão avaliar de uma forma mais científica os problemas existentes e buscar soluções tecnológicas inovadoras, e por fim para a continuidade das pesquisas e trabalhos futuros nesta área.

6.2 Trabalhos Futuros

Como aprimoramento futuro e continuidade das pesquisas existem a necessidade da realização de mais testes de campo em diferentes regiões do país para a consolidação da proposta apresentada. Também é importante o acompanhamento das novas tecnologias de fabricação de circuitos integrados com o objetivo de buscar no futuro uma solução integrada em um único *chip*. Assim será possível receber o sinal de RF e entregá-lo em *Transport Stream* para o próximo estágio do produto. Algumas pesquisas já estão sendo realizadas com o objetivo de integrar o demodulador dentro do decodificador (*back end*), mas nestes casos, ainda existe a necessidade do sintonizador, porque a parte analógica ainda não está sendo integrada. Outras duas linhas importantes nas pesquisas futuras são: o *Software Defined Radio*, (SDR) que é um sistema em *software* para realizar as funções da proposta apresentada nesta tese; e o *Ultra Wideband Receiver* (UWB), que é um sistema de recepção de banda larga que se ajusta automaticamente à frequência do sinal que se pretende sintonizar. Estas duas tecnologias poderão se juntar no futuro, produzindo um sistema de recepção de banda larga por *softwares*.

Referências

ABNT Norma Brasileira NBR 15601 // Televisão Digital Terrestre - Sistema de Transmissão. - São Paulo : ABNT, 2007.

ABNT Norma Brasileira NBR 15602-1 // Televisão Digital Terrestre - Codificação de vídeo, áudio e multiplexação. - São Paulo : ABNT, 2007. - Vol. Parte 1.

ABNT Norma Brasileira NBR 15602-2 // Televisão Digital Terrestre - Codificação de vídeo, áudio e multiplexação. - São Paulo : ABNT, 2007. - Vol. Parte 2.

ABNT Norma Brasileira NBR 15602-3 // Televisão Digital Terrestre - Codificação de vídeo, áudio e multiplexação. - São Paulo : ABNT, 2007. - Vol. Parte 3.

ABNT Norma Brasileira NBR 15603-1 // Televisão Digital Terrestre - Multiplexação e Serviços de Informação. - São Paulo : ABNT, 2007. - Vol. Parte 1.

ABNT Norma Brasileira NBR 15603-2 // Televisão Digital Terrestre - Multiplexação e Serviços de Informação. - São Paulo : ABNT, 2007. - Vol. Parte 2.

ABNT Norma Brasileira NBR 15603-3 // Televisão Digital Terrestre - Multiplexação e Serviços de Informação. - São Paulo : ABNT, 2007. - Vol. Parte 3.

ABNT Norma Brasileira NBR 15604 // Televisão Digital Terrestre - Receptores. - São Paulo : ABNT, 2007.

ABNT Norma Brasileira NBR 15605. - São Paulo : ABNT, 2007.

ABNT Norma Brasileira NBR 15606-1 // Televisão Digital Terrestre - Codificação de dados e especificações de transmissão para a radiodifusão terrestre. - São Paulo : ABNT, 2007. - Vol. Parte 1.

ABNT Norma Brasileira NBR 15606-2 // Televisão Digital Terrestre - Codificação de dados e especificações de transmissão para a radiodifusão terrestre. - São Paulo : ABNT, 2007. - Vol. Parte 2.

ABNT Norma Brasileira NBR 15606-3 // Televisão Digital Terrestre - Codificação de dados e especificações de transmissão para a radiodifusão terrestre. - São Paulo : ABNT, 2007. - Vol. Parte 3.

ABNT Norma Brasileira NBR 15607. - São Paulo : ABNT, 2007.

ANATEL Ato 4.609, de 30 de Agosto de 1999. - Brasília : ANATEL, 1999.

ANATEL Consulta Pública // Consulta Pública No. 216, de 17 de Fevereiro de 2000. - Brasília : ANATEL, 2000.

ANATEL Consulta Pública // Consulta Pública No. 237, de 02 de junho de 2000. - Brasília : ANATEL, 2000.

ANATEL Regulamento Técnico // Regulamento Técnico para a Prestação dos Serviços de Radiodifusão de Sons e Imagens e de Retransmissão de Televisão. - Brasília : ANATEL, 2005.

ANATEL Resolução No. 69, de 23 de Novembro de 1998 // Aprova os Procedimentos para Expedição de Autorização para Realização de Experiências com Sistemas de Transmissão Digital de Televisão. - Brasília : ANATEL, 1998.

ARIB ARIB Standard - ARIB STD-B10 // Service Information for Digital Broadcasting System. - Tokyo, Japan : Association of Radio Industries and Business, 2003.

ARIB ARIB Standard - ARIB STD-B21 // Receiver for Digital Broadcasting. - Tokyo, Japan : Association of Radio Industries and Business, 2003.

ARIB ARIB Standard - ARIB STD-B32 // Video Coding, Audio Coding, and Multiplexing Specifications for Digital Broadcasting. - Tokyo, Japan : Association of Radio Industries and Business, 2004.

ARIB ARIB Standard ARIB STD B-24 // Data Coding and Transmission Specification for Digital Broadcasting. - Tokyo, Japan : Association of Radio Industries and Business, 2002. - Vol. 1.

ARIB ARIB TECHNICAL REPORT // Operational Guidelines for Digital Terrestrial Television Broadcasting. - Tokyo, Japan : Association of Radio Industries and Business, 2006.

BEDICKS JUNIOR GUNNAR [et al.] Digital Signal Disturbed by Impulsive Noise [Artigo] // IEEE Transaction on Broadcasting. - Piscataway, NJ : IEEE, March de 2005. - 3. - Vol. 51. - pp. 38 - 40.

BEDICKS JUNIOR GUNNAR [et al.] Outlines of the Brazilian DTTB System - ISDB-TB // 57o. Broadcasting Technology Symposium. - Washington, DC : [s.n.], 2007.

BEDICKS JUNIOR GUNNAR [et al.] Results of the ISDB-T system tests, as a part of the digital TV study carried out in Brazil [Artigo] // IEEE Transactions on Broadcasting. - Piscataway, NJ, USA : IEEE, March de 2006. - 1. - Vol. 52.

BEDICKS JUNIOR GUNNAR Dissertação de Mestrado // Estudo para a Implementação de uma Rede de Frequência Única para TV Digital com Modulação COFDM. - São Paulo, SP : [s.n.], 2000.

CHANG ROBERT W. Orthogonal Frequency Multiplex Data Transmission System [Patente]. - USA, 6 de January de 1970.

COLLINS GERALD W. Fundamentals of Digital Television Transmission [Livro]. -

Danvers, MA, USA : John Wiley & Sons, Inc., 2001.

FISHER WALTER Digital Television: A Practical Guide for Engineers [Livro]. -

Heidelberg : Springer-verlag, 2004.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION Guidelines and Techniques for the Evaluation of DTTB Systems [Report]. - Geneve, Switzerland : ITU, 2003.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION ITU-R V.431-7 Nomenclature of the frequency and wavelenght bands in telecommunications. [Report]. - Geneve.

Switzerland : ITU, 2000.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION Recommendation ITU-R

BT.500-11 // Methodoly for the subjective assessment of the quality of television pictures. - Genebra. Suiça : ITU, 2002.

LABORATÓRIO DE TV DIGITAL MACKENZIE Testes em Sistemas de Televisão

Digital [Relatório]. - São Paulo : Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2000.

LIANG WEIQIANG [et al.] Digital Terrestrial Television Broadcasting in China

[Periódico]. - New Jersey, NJ, USA : IEEE, Julho de 2007. - p. 92 a 97.

LITWIN LOUIS e PUGEL MICHAEL The principles of OFDM [Periódico]. - [s.l.] : RF

Design, 2001. - pp. 30-48.

MICROTUNE INC. MT2131 Single Chip Terrestrial Tuner Product Brief. - Plano, TX,

USA : Microtune Inc., 2005.

MINISTÉRIO DAS COMUNICAÇÕES Exposição de Motivos // TV Digital: Exposição de Motivos do Decreto que institui o SBTVD. - Brasília : Ministério das Comunicações, 2003.

MINISTÉRIO DAS COMUNICAÇÕES Portaria No. 652 de 10 de Outubro de 2006. - Brasília : Ministério das Comunicações, 2006.

NORSWORTHY John Technical Backgrounder // Tuners Serving Today's High Performance Broadband Applications Require Carefull Attention to Key Performance Parameters. - Plano, TX, USA : Microtune, Inc., 2001.

NXP, BV Silicon Tuner: TDA18292HN [Periódico]. - [s.l.] : NXP BV..

O'LEARY SEAMUS Understanding Digital Terrestrial Broadcasting [Livro]. - Norwood, MA : Artech House, Inc., 2000.

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA Decreto No. 4901, de 26 de Novembro de 2003 // Institui o Sistema Brasileiro de TV Digital - SDBTV e dá outras providências. - Brasília : Casa Civil, 2003.

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA Decreto No. 5820, de 29 de Junho de 2006 // Dispõe sobre a implantação do SBTVD-T e dá outras providências. - Brasília : Casa Civil, 2006.

RAZAVI BEHZAD RF Microelectronics [Book]. - Upper Saddle River, NJ, USA : Prentice-Hall. Inc., 1998.

REVISTA DA SET Começa a Era Digital na TV Brasileira [Periódico]. - São Paulo : Enepress, 2006. - 87.

ROSE FRANK The End of TV as we know it [Periódico]. - [s.l.] : Wired Magazine, 2004. - December.

SEGAL GARY Silicon Tuners [Conferência] // Freescale Technology Forum. - Orlando, FL, USA : [s.n.], 2005.

SHIOMI TADASHI e HATORI MITSUTOSHI Digital Broadcasting [Livro]. - Tokyo, Japan : Ohsma, Ltd., 2000.

TOSHIBA CORPORATION TC90A87XBG // Product Specification. - 2006.

VALENTINE MARK Silicon tuners aids transition to digital TV [Periódico]. - [s.l.] : RF Design, 2006. - Março.

VIZMULLER PETER RF Design Guide: Systems. Circuits and Equations [Livro]. - Norwood, MA, USA : Artech House, Inc., 1995.

WIKIMEDIA COMMONS

http://commons.wikimedia/wiki/Image:Atmospheric_electromagnetic_transmittance_or_opacity.jpg [Online] // Wikimwdia. - 26 de Abril de 2008.

WONG ALVIN K. e DU VAL JORDAN Silicon TV Tuners poised to replace cans [Periódico]. - Overland Park, KS, USA : RF Dsign, 2005. - Outubro.

ZUFFO MARCELO KNÖRICH TV Digital Aberta no Brasil: Políticas Estruturais para um Modelo Nacional. - São Paulo : Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos - Escola Politécnica - USP, 2003.

ANEXOS

A. MODULAÇÃO MULTIPLEXADA POR DIVISÃO DE FREQUÊNCIAS ORTOGONAIS - OFDM

A.1 Introdução

No dia 14 de novembro de 1966, o pesquisador Robert W. Chang, do *Bell Telephone Laboratories*, apresentou ao escritório de patentes americano “*United States Patent Office*” um pedido de patente com o nome de “*Orthogonal Frequency Multiplex Data Transmission System*” contendo os princípios da modulação OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing* – Multiplexação por Divisão de Frequências Ortogonais) (CHANG, 1970). No dia 6 de janeiro de 1970 a patente número 3.488.445 foi-lhe concedida. A Figura A.1 mostra o diagrama de blocos do pedido de patente depositado por Chang.

Figura A.1 - Orthogonal Frequency Multiplex Data Transmission System

Apesar da maturidade dos princípios da OFDM, apenas mais recentemente que os interesses práticos desta técnica aumentaram, em parte devido à evolução tecnológica em processamento de sinais e microeletrônica. A modulação OFDM vem se tornando muito popular em sistemas de comunicação, como por exemplo: transmissão de dados através da linha telefônica, sistemas sem fio (*wireless*), rádio digital, e TV digital. No passado, como também no presente, este mesmo esquema de modulação é referenciado como Multitom, Multiportadora, Transformada de Fourier, e Comunicação Multiplexada por Divisão de Freqüências Ortogonais. Neste documento será utilizado o nome mais recente e abreviado: OFDM.

A.2 O Sistema de Modulação de Portadora Única

Uma amostra do espectro de um sistema de modulação de portadora única é mostrada na Figura A.2. Neste sistema, informação é transportada em uma única portadora modulada em amplitude, freqüência, ou fase. Para os sinais digitais, a informação está em forma de bits ou em um conjunto de bits chamado de símbolos, que modulam a portadora. Assim, com a necessidade de uso de taxas de bits mais elevadas, o tempo de duração de um bit, ou o tempo de duração dos símbolos diminuem. O sistema se torna mais vulnerável a ruídos impulsivos, multipercursos, atenuações e outras interferências existentes no canal de transmissão, acarretando como consequência a perda das informações transmitidas. Estas imperfeições existentes no canal impedem que o receptor recupere a informação transmitida, e somando-se a isto, conforme a largura de banda utilizada pela portadora única aumenta, a suscetibilidade de interferência proveniente de outras fontes de sinais contínuos aumenta. Este tipo de interferência é muito comum e é chamada de CW (*Continuous Wave*) ou interferência de freqüência (LITWIN, et al., 2001).

Figura A.2: Espectro de uma modulação com portadora única (LITWIN, et al., 2001)

A.3 O Sistema de Modulação “Multiplexação por Divisão de Freqüências”

O sistema de Multiplexação por Divisão de Freqüência (*Frequency Division Multiplexing* - FDM) estende o conceito de modulação por portadora única com o uso de subportadoras no mesmo canal, como mostra a Figura A.3. A taxa total de dados a ser transmitida neste canal é dividida entre as subportadoras. Os dados não precisam ser divididos igualmente entre as portadoras, nem mesmo ter origem na mesma fonte de informação. As vantagens incluem modulação e demodulação independentes, dimensionadas para um tipo particular de aplicação, ou a transmissão de um conjunto de dados transmitido utilizando-se múltiplos e diferentes esquemas de modulação. Um bom exemplo do modelo FDM são os sistemas de transmissão de TV analógica e rádio FM, cada canal ocupa um espaço fixo e distinto no espectro de radiofrequências. O FDM oferece a vantagem em relação ao sistema de portadora única em se tratando de interferência em uma banda mais estreita, haja vista que esta interferência a princípio, ocorrerá apenas em uma das sub-bandas e não afetará as outras. Como cada subportadora tem uma taxa de informação mais baixa, o período do símbolo em um sistema digital será mais longo, incrementando uma maior imunidade ao ruído impulsivo e ao multipercurso. Os sistemas FDM geralmente necessitam de uma banda de guarda entre as subportadoras para prevenir que o espectro de uma sub-banda interfira no espectro de outra sub-banda. Estas bandas de guarda diminuem a taxa efetiva de transmissão comparando-se com o sistema de portadora única (LITWIN, et al., 2001).

Figura A.3: Espectro do sinal FDM (LITWIN, et al., 2001)

A.4 Ortogonalidade e OFDM

Se o sistema FDM apresentado anteriormente tivesse a capacidade de utilizar um conjunto de subportadoras ortogonais entre si, um alto nível de eficiência espectral poderia ter sido atingido. Desta forma, as bandas de guarda que eram necessárias para permitir a demodulação individual das subportadoras no sistema FDM não seriam mais necessárias. O uso de subportadoras ortogonais permite a sobreposição do espectro das subportadoras, incrementando assim a eficiência espectral. Mantendo-se a ortogonalidade, é possível recuperar o sinal de cada subportadora individualmente, mesmo com a sobreposição do espectro. Se o produto escalar de dois sinais determinísticos é igual a zero, diz-se que estes sinais são ortogonais entre si. A ortogonalidade pode ser vista do ponto de vista dos processos estocásticos. Se dois processos aleatórios são não relacionais, então eles são ortogonais. Dada a natureza aleatória dos sinais em sistemas de comunicação, esta visão probabilística da ortogonalidade, dá um entendimento intuitivo das implicações da ortogonalidade em OFDM. Recordando a teoria de “Sinais e Sistemas”, onde os senos e cossenos da transformada discreta de Fourier formam um conjunto ortogonal básico, o sinal, no espaço vetorial da DFT pode ser representado como uma combinação linear de senóides ortogonais. Uma leitura da DFT é que a transformada essencialmente correlaciona seu sinal de entrada com cada uma das funções senoidais bases. Se o sinal de entrada tem uma determinada energia em uma determinada frequência, haverá um pico na correlação do sinal de entrada e as senóides bases que estão naquela frequência correspondente. Esta transformada é utilizada no transmissor OFDM para “mapear” um sinal de entrada em um conjunto de subportadoras ortogonais, como por exemplo, as funções ortogonais bases da DFT. Da mesma forma, a transformada é utilizada novamente no receptor OFDM para processar as subportadoras recebidas. Os sinais das subportadoras são então combinados para formar uma estimativa do sinal original da fonte, proveniente do transmissor.

A natureza ortogonal e não correlacional das subportadoras é profundamente explorada na OFDM com ótimos resultados. Como as funções bases da DFT são “não correlacionais”, a correlação praticada na DFT para uma determinada subportadora apenas enxerga a energia daquela correspondente subportadora. A energia das outras subportadoras não acrescenta nada porque elas estão não correlacionadas. Esta separação da energia do sinal é a razão pela qual os espectros das subportadoras OFDM podem sobrepor sem causar interferência.

O conceito principal por tras da modulação OFDM é de distribuir o fluxo de dados a ser transmitido em N fluxos paralelos com uma taxa de transmissão reduzida e transmiti-los separadamente, cada um deles em uma subportadora separada. Estas portadoras são feitas ortogonais escolhendo-se apropriadamente o espaçamento de frequência entre elas. Mas mesmo assim, a sobreposição espectral ao longo das subportadoras é permitida, haja vista que a ortogonalidade garantirá ao receptor a possibilidade de separá-las, e também uma melhor eficiência espectral poderá ser atingida, do que em uma modulação FDM simples. A seguir será apresentada uma descrição matemática do sinal OFDM e um sistema OFDM típico (LITWIN, et al., 2001).

A.5 O Sinal OFDM

Na sua forma genérica, um sinal OFDM pode ser descrito com um conjunto de portadoras moduladas, e transmitidas em paralelo, como segue:

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[\sum_{k=0}^{N-1} C_{n,k} \cdot g_k(t - n \cdot T_s) \right] \quad (1)$$

com

$$g_k(t) = \begin{cases} e^{j2\pi f_k t} & t \in [0, T_s] \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2)$$

e

$$f_k = f_0 + \frac{k}{T_s}, \quad k = 0 \dots N-1 \quad (3)$$

onde

- $C_{n,k}$ é o símbolo transmitido na k-ésima subportadora no n-ésimo intervalo sinalizado, cada um com uma duração T_s
- N é o número de subportadoras OFDM
- f_k é a k-ésima frequência da subportadora, com f_0 sendo a frequência mais baixa a ser utilizada.

Define-se o n-ésimo quadro OFDM como o sinal transmitido para o n-ésimo intervalo de sinalização com duração igual a um período de símbolo T_s , e denotado por $F_n(t)$.

Substituindo-se $F_n(t)$ na equação (1) ao invés do termo entre parênteses que corresponde ao n -ésimo quadro OFDM, a relação pode ser reescrita como

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} F_n(t) \quad (4)$$

e assim, $F_n(t)$ corresponde ao conjunto de símbolos $C_{n,k}$, $k=0\dots N-1$, cada um transmitido na correspondente subportadora f_k .

A demodulação é baseada na ortogonalidade das portadoras $g_k(t)$, denominadas:

$$\int_{\mathcal{R}} g_k(t) \cdot g_l^*(t) dt = T_s \cdot \delta(k - l) \quad (5)$$

onde o demodulador implementará a relação:

$$C_{n,k} = \frac{1}{T_s} \cdot \int_{nT_s}^{(n+1)T_s} s(t) \cdot g_k^*(t) dt \quad (6)$$

O diagrama de blocos do modulador OFDM e do demodulador OFDM é mostrado na Figura A.4, onde, por simplicidade, não estão incluídos os filtros inerentes ao sistema de comunicação.

Figura A.4 - Modulador e Demodulador OFDM

Com o objetivo de tornar o sistema OFDM mais prático é necessário uma construção mais econômica do modulador e demodulador, haja vista que de acordo com a figura anterior, haveria a necessidade de um grande número de moduladores e demoduladores idênticos. Esta

nova construção poderá ser atingida através do processamento de sinais do tempo discreto e fazendo uso das propriedades de filtragem da transformada discreta de Fourier (DFT). Amostrando o sinal de baixa frequência equivalente de (1) e (4) a uma taxa N vezes maior do que a taxa de símbolo $\frac{1}{T_s}$ da subportadora, e considerando $f_0=0$ (frequência da portadora igual a mais baixa frequência da subportadora), o quadro OFDM pode ser expresso por:

$$F_n(m) = \sum_{k=0}^{N-1} C_{n,k} \cdot g_k(t - nT_s) \big|_{t=(n+\frac{m}{N})T_s}, m = 0 \dots N-1 \quad (7)$$

o que leva a

$$F_n(m) = e^{j2\pi f_0 T_s \frac{m}{N}} \cdot \left(\sum_{k=0}^{N-1} C_{n,k} \cdot e^{j2\pi k \frac{m}{N}} \right) = N \cdot IDFT\{C_{n,k}\} \quad (8)$$

De acordo com a exposição anterior, é possível identificar as diferenças entre OFDM e FDM. Considerando agora a densidade espectral de potência para os dois sistemas, com modulação BPSK (*Binary Phase Shift Keying*) em todas as suas portadoras, e ainda, considerando que o fluxo de dados, com taxa R , passa por uma conversão adequada serial para paralela (S/P), a Figura A.5 mostra os dois espectros indicando a largura de banda ocupada W como uma função do número de portadoras. É possível observar que o sinal OFDM necessita de uma largura de banda menor do que o sinal FDM, conforme o número de portadoras aumenta. No limite tem-se:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} W = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N+1}{N} \cdot R = R = \frac{N}{T_s} \quad (9)$$

Isto é possível, desde que haja uma sobreposição espectral, o que é resolvido fazendo uso da ortogonalidade das subportadoras, como demonstrado nas equações (5) e (6). Fazendo-se a amostragem, como descrita anteriormente, o sinal OFDM não terá perdas, desde que, como visto em (9), as duas larguras de bandas laterais do sinal OFDM passa baixa equivalente (desprezando os lóbulos laterais devido à subportadoras externas) $W = \frac{N}{T_s}$. Assim, a taxa de

amostragem $\frac{N}{T_s}$ é exatamente correspondente a taxa de *Nyquist*, e desta forma não existirá a distorção conhecida como “*aliasing*”.

Figure A.5 - Densidade Espectral de Potência; OFDM versus FDM

Figura A.6 - Espectro de potência típico de um sinal OFDM

A Figura A.6 mostra o espectro de potência típico de um sinal OFDM, onde o eixo das frequências está normalizado para o espaçamento entre portadoras $\frac{1}{T_s}$.

O quadro OFDM amostrado pode ser gerado até o limite de um fator multiplicador N, utilizando-se a transformada discreta inversa de Fourier - IDFT (função de modulação), e assim, os dados transmitidos podem ser recuperados do quadro OFDM através da transformada discreta de Fourier – DFT (função de demodulação). Um diagrama de blocos do sistema OFDM utilizando a DFT é mostrado na Figura A.8.

Figura A.7 - Sistema de comunicação OFDM

A.6 O Prefixo Cíclico

Quando um sinal $s(t)$ passa através de um canal com resposta impulsiva $h(t)$, o sinal na saída é dado pela convolução:

$$r(t) = h(t) * s(t) \quad (10)$$

Se o canal não for ideal, poderá existir uma interferência inter-simbólica (ISI). É conveniente observar o sinal OFDM em termos de “*data frames*” (quadro de dados), para que desta forma possa-se também observar que o canal que produzirá ISI dentro dos quadros, também produzirá interferência inter quadros (*inter frame interference* - IFI) ao longo dos quadros adjacentes. Considerando o sinal equivalente do tempo discreto e o canal h_i , $i=0\dots L$, com L sendo o atraso espalhado pelo canal, relação (10) vem:

$$r_m = \sum_{i=0}^L h_i \cdot s_{m-i} \quad (11)$$

A Figura A.8 mostra esta convolução para o caso particular de $L=2$. A partir desta representação gráfica pode se visto que a introdução de um intervalo de guarda de comprimento igual ao atraso L , do canal, entre dois quadros adjacentes “absorverá” o atraso do canal e assim, removerá a IFI.

Figura A.8 - Interferência IFI em sistemas OFDM

Esta técnica deverá ser completada com a inserção de L zeros condutores em cada quadro, no transmissor e a remoção destes zeros no receptor. Apesar disto, para também eliminar a ISI dentro dos quadros, é melhor usar um prefixo cíclico ao invés de um intervalo de guarda preenchido com zeros. Neste caso, após extrair-se o prefixo no receptor, ter-se-á a convolução periódica (cíclica) do quadro de dados transmitidos com o canal. O quadro cíclico estendido pode ser escrito como

$$F_n^\uparrow(m) = \begin{cases} F_n(N+m) & , m = -L \dots -1 \\ F_n(m) & , m = 0 \dots N-1 \end{cases} \quad (12)$$

Onde

$$F_n(m) = \sum_{k=0}^{N-1} c_{n,k} \cdot e^{j2\pi k \frac{m}{N}} \quad m = 0 \dots N-1 \quad (13)$$

Após descartar o prefixo, os quadros recebidos se tornam

$$\hat{F}_n(m) = \sum_{i=0}^{N-1} F_n(m-i)_N \cdot h_i \quad (14)$$

onde $(m-i)_N$ representa a subtração em módulo de N . Após a demodulação DFT tem-se

$$\hat{c}_{n,k} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{m=0}^{N-1} \hat{F}_n(m) \cdot e^{-j2\pi k \frac{m}{N}} = c_{n,k} \cdot H_k, \quad k = 0 \dots N-1 \quad (15)$$

onde H_k é a função de transferência do canal na frequência da subportadora f_k , da relação (3). Portanto, utilizando-se o prefixo cíclico, o efeito do canal é transformado em uma multiplicação complexa dos símbolos de dados com os coeficientes H_k , do canal, e assim, todas ISI e IFI são removidas. Na Figura A.8, também estão representados os blocos de inserção e extração do prefixo cíclico.