

Universidade Estadual de Campinas  
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação



**Dissertação de Mestrado**

# **Utilização da Rede SFN para Expansão da Rede de Retransmissão Regional da TV Digital Aberta Terrestre.**

**Autor: Silvio Renato Messias de Carvalho**

**Orientador: Prof. Dr. Yuzo Iano**

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica

**Banca Examinadora**

Prof. Dr. Fujio Yamada (UNIVERSIDADE MACKENZIE)

Prof. Dr. Luiz César Martini (DECOM-FEEC-UNICAMP)

Prof. Dr. Vicente Idalberto Becerra Sablón (DECOM-FEEC-UNISAL )

Profª. Dra. Ana Lúcia Mendes Cruz Silvestre da Silva (DECOM-FEEC-UNICAMP)

Campinas, SP- Brasil

Agosto / 2006

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

C253u Carvalho, Silvio Renato Messias de  
Utilização da Rede SFN para expansão da rede de retransmissão regional da TV digital aberta terrestre / Silvio Renato Messias de Carvalho. --Campinas, SP: [s.n.], 2006.

Orientador: Yuzo Iano  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Televisão digital. 2. Modulação digital. 3. Radiodifusão. 4. Radioteledifusão. I. Iano, Yuzo. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

## Resumo

Este trabalho apresenta uma proposta para as redes retransmissoras de TV aberta que pode ser implantada com o advento da TV digital no Brasil, baseada em modulações utilizando sistemas COFDM. Diferentemente do sistema tradicional que se baseia na retransmissão em multifrequência (MFN), a proposta aqui descrita propõe o uso de uma rede em frequência única (SFN) para a retransmissão. O ponto inicial é a atual rede com múltiplos canais de retransmissão analógicos existente. Sua cobertura deverá ser replicada pela nova rede em um único canal onde trafega uma determinada programação de uma emissora de TV. A modificação proposta apresenta vantagens para as emissoras de televisão que possuam redes de retransmissão destinadas a ampliar sua cobertura em uma área regional com várias cidades, obtendo um ambiente de rede muito mais controlado e seguro. O trabalho apresenta simulações de cobertura mostrando que a possibilidade de trabalhar com redes SFN surge como uma alternativa mais rápida de viabilização da TV Digital para o interior do Brasil.

## Abstract

This work presents an approach to the network relay station for free broadcasting television that may be constructed with the future digital television in Brazil based on COFDM modulation. Differently of the traditional system, the network relay in multi frequencies (MFN), the proposal here described considers the use of a net in only one frequency (SFN) for the network relay. The initial point is the current network with multiple analogical channels of existing network relay. Its covering will have to be talked back by the new net in an unique channel where only one TV programming passes through. The modification proposal presents advantages for the network relay broadcasting television destined to extend its covering in a local area with some cities being gotten environment of a much more controlled and safe net. The work presents covering simulation showing that the possibility to work with nets SFN appears as a faster alternative of accomplishment of the Digital TV for the regional area of Brazil.

*' Se colocarmos 100% da nossa atenção no problema não teremos capacidade para perceber a solução ao lado...'*

*'Às estrelas cabem os segredos e aos homens cabe o entendimento...'*

# Agradecimentos

*'Agradeço a Deus por estar em um caminho cheio de amigos e à minha família que sempre me apoiou em todos os momentos...'*

*'Agradeço a todas as dificuldades que surgiram ao longo da jornada porque são elas que nos deixam mais fortes e confiantes para seguir em frente...'*

*'Agradeço a todos do Laboratório de Comunicações Visuais LCV pelo apoio e paciência dedicados e ao DECOM, FEEC e UNICAMP.'*

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b> .....	<b>xi</b>
-------------------------------	-----------

<b>Lista de Tabelas</b> .....	<b>xv</b>
-------------------------------	-----------

<b>Abreviaturas e Símbolos</b> .....	<b>xvii</b>
--------------------------------------	-------------

<b>Capítulo 1 Introdução</b> .....	<b>1</b>
------------------------------------	----------

Introdução .....	1
1.1 TV Terrestre Aberta; Evolução Tecnológica e Motivações.....	1
1.1.1 Elementos Básicos de TV e Percepção Visual.....	2
1.1.2 Ocupação Espectral, Entrelaçamento e Modulação AM Vestigial .....	5
1.2 A Importância da Transmissão em HDTV.....	7
1.3 Convergência e Mobilidade .....	8
1.4 O que é canalização.....	8
1.6 Influência da Canalização Analógica na Canalização Digital .....	9
1.7 Retransmissão de Sinais.....	10
1.8 Contribuições e Organização do Trabalho .....	11

<b>Capítulo 2 Modulação OFDM</b> .....	<b>15</b>
--	-----------

2.1 Evolução FDM, OFDM e COFDM .....	15
2.2 Princípios Básicos da Modulação OFDM.....	17
2.3 Intervalo de Guarda.....	27
2.4 Portadoras Múltiplas X Portadora Única .....	29
2.5 Vantagens na Recepção Móvel .....	33
2.5 Comentários .....	36

<b>Capítulo 3 Plano Básico de TV Digital</b> .....	<b>37</b>
--	-----------

3.1 Canalização no Brasil.....	37
--------------------------------	----

3.2 Resultados Importantes do Relatório Técnico .....	44
3.2.1 Recepção com Antena Externa .....	44
3.2.2 Recepção com Antena Interna .....	46
3.2.3 Relações de Proteção .....	48
3.2.4 Critérios adotados no Planejamento.....	49
3.3 Planejamento Oficial de Canais de TV Digital no Brasil.....	50
3.3.1 Premissas Adotadas para o Planejamento .....	50
3.3.2 Classificação das Estações Digitais .....	51
3.3.3 Contorno Protegido.....	53
3.3.4 Relações de Proteção .....	53
3.3.5 Determinação do Sinal Interferente .....	55
3.4 Reuso de Frequências.....	56
3.4.1 Alterações no PBTVD para Viabilização das Redes SFN .....	57
3.5 Comentários .....	58
<b>Capítulo 4 Redes de Frequência Única.....</b>	<b>59</b>
4.1 Definição de Rede de Frequência Única (SFN) .....	59
4.2 Modelo Matemático Utilizado para Rede SFN .....	61
4.2.1 Função Peso para Divisão entre Potência Útil e Interferente.....	67
4.3 Sincronização do Receptor.....	70
4.3.1 Estratégia do Sinal Mais Forte .....	72
4.3.2 Estratégia do Centro de Gravidade .....	73
4.3.3 Estratégia do Primeiro Sinal Acima do Limiar .....	75
4.3.4 Método “Quasi-Ótimo” e Máxima Relação C/I.....	76
4.3.5 Ruído Impulsivo e Filtro LCF.....	77
4.4 Comentários .....	79
<b>Capítulo 5 Simulação e Resultados.....</b>	<b>81</b>
5.1 Caracterização da Rede de Retransmissão Analógica.....	81
5.2 Planejamento da Rede de Retransmissão Digital.....	85
5.3 Análise da Região de Fronteira .....	90
5.4 Expandindo a Rede .....	97
5.5 Expandindo o “Braço” Norte .....	100

5.6 Expandindo o “Braço” Leste.....	105
5.7 Expandindo o “Braço” Sul.....	109
5.8. Planejamento para recepção móvel.....	112
5.8 Sincronismo em Tempo .....	114
5.9 Simulação em Laboratório .....	118
5.10 Comentários .....	120
<b>Capítulo 6 Conclusões e Trabalhos Futuros.....</b>	<b>121</b>
6.1 Replicação da Área de Cobertura.....	121
6.2 Contribuições de Sinal de Vários Transmissores.....	122
6.3 Uniformidade da Rede e Custos.....	122
6.4 Recepção Móvel.....	123
6.5 Diferenças no Planejamento.....	123
6.6 Sincronismo.....	123
6.7 Trabalhos Futuros.....	124
<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>125</b>
<b>Anexo I.....</b>	<b>129</b>
<b>Artigos Submetidos.....</b>	<b>131</b>

# Lista de Figuras

## Capítulo 1

Figura 1.1. Relação de Aspecto 4:3.....	3
Figura 1.2 Relação de Aspecto 16:9.....	3
Figura 1.3 Comparação entre Formatos de Tela.....	5
Figura 1.4 Modulação AM Vestigial.....	6

## Capítulo 2

Figura 2.1 Modulador OFDM Básico.....	17
Figura 2.2 Demodulador OFDM.....	19
Figura 2.3 Estimação da Resposta em Frequência do Canal entre Sinal Transmitido e Recebido.....	21
Figura 2.4 Modulador OFDM IDFT.....	24
Figura 2.5 Demodulador OFDM DFT.....	25
Figura 2.6 Sistema OFDM com Transmissão da parte Imaginária.....	26
Figura 2.7 Sistema de Modulação OFDM empregando IFFT-IDFT.....	27
Figura 2.8 Diagrama do Intervalo de Guarda em Relação ao Símbolo OFDM.....	28
Figura 2.9 (A) Desvanecimento Seletivo.....	30
Figura 2.9 (B) Desvanecimento Plano.....	31
Figura 2.10 Comparação entre a Distribuição de Potência Recebida, Mono e Multi Portadora.....	34
Figura 2.11 Interferência entre dois Transmissores.....	34
Figura 2.12 Diminuição da Interferência entre Duas Redes SFN.....	35

## Capítulo 3

Figura 3.1a Canais Analógicos X Quantidade.....	42
Figura 3.1b Canais Digitais X Quantidade.....	43
Figura 3.2 Relação entre Retransmissoras e Geradoras no Brasil.....	43

## Capítulo 4

Figura 4.1 Rede MFN.....	60
Figura 4.2 Rede SFN.....	60

Figura 4.3 Degradação do sinal devido às condições de propagação.....	61
Figura 4.4 Localizações importantes para análise em uma SFN.....	63
Figura 4.5 Ilustração de um receptor OFDM Simplificado.....	64
Figura 4.6 Diferentes atrasos do sinal em sua propagação.....	66
Figura 4.7 Função $Q(\tau)$ entre Potência Útil e Interferente para Sistemas Convencionais OFDM.....	68
Figura 4.8 Função $L(\tau)$ utilizada para relação de Potência Útil - Interferente.....	69
Figura 4.9 Modelo para divisão do sinal em útil e interferente usando demodulação coerente.....	70
Figura 4.10 Primeiro Passo de Sincronização.....	71
Figura 4.11 Sincronização no Sinal mais Forte.....	72
Figura 4.12 Sincronização no Sinal 3, mais Forte.....	73
Figura 4.13 Situação da Resposta ao Impulso dos Sinais.....	74
Figura 4.14 Sincronização através do Método do Centro de Gravidade.....	74
Figura 4.15 Situação da Resposta ao Impulso dos Sinais Destacando o Nível Limiar.....	75
Figura 4.16 Sincronização do Primeiro Sinal acima do Limiar.....	76
Figura 4.17 Diagramas de Fluxo descrevendo a Estratégia 'Quasi-Ótima'.....	77
Figura 4.18 LCF Filtro Cancelador de Elo Realimentação.....	79
<b>Capítulo 5</b>	
Figura 5.1 Área de Retransmissão Típica de uma Emissora Geradora de Televisão.....	84
Figura 5.2- Área de Cobertura da Geradora Principal Potência 502 W ERP.....	86
Figura 5.3- Diagrama de Irradiação da Antena de Transmissão da Geradora Principal.....	86
Figura 5.4 Simulação da Intensidade de Campo na Radial Campinas-Piracicaba Distância 65 km.....	88
Figura 5.5 Perfil do Terreno na Radial Campinas-Piracicaba.....	88
Figura 5.6 Área de Cobertura do Contorno Protegido de Piracicaba Potência 80 W ERP.....	89
Figura 5.7. Esboço do Detalhe da Região de Borda entre Campinas 502 W ERP e Piracicaba 80 W ERP.....	90
Figura 5.8 Pontos para avaliação do sinal na fronteira dos contornos protegidos Campinas 502 W ERP e Piracicaba 80 W ERP.....	92
Figura 5.9 Campinas 502 W ERP e Piracicaba 80 W ERP.....	93

Figura 5.10 Geradora Principal com 100 W de Potência ERP.....	93
Figura 5.11 Área de cobertura do Posto Retransmissor de Santa Bárbara d'Oeste.....	94
Figura 5.12 Situação de Piracicaba 80 W ERP e a Geradora Principal com 100 W ERP.....	94
Figura 5.13 Nova área de cobertura da Rede.....	95
Figura 5.14 Situação com os postos de São Pedro e Piracicaba cobrindo as cidades de Charqueada e Ipeúna.....	97
Figura 5.15 Área de cobertura de Capivari.....	98
Figura 5.16 Área de cobertura da Rede SFN região Oeste.....	99
Figura 5.17 Área de cobertura de Limeira mostrando Cordeirópolis e Iracemápolis.....	100
Figura 5.18 Área de cobertura de Araras.....	101
Figura 5.19 Diagrama de Antena Diretiva utilizada em Araras com orientação a 180°.....	101
Figura 5.20 Área de Cobertura de Araras com 25 W ERP e Antena Diretiva.....	102
Figura 5.21 Área de Cobertura de Limeira.....	103
Figura 5.22 Área de Cobertura de Limeira, Araras e Cordeirópolis.....	103
Figura 5.23 Posto de Mogi-Guaçú 80 W ERP.....	104
Figura 5.24 Radial Obstruída entre Limeira e Mogi-Guaçú.....	104
Figura 5.25 Área de Cobertura de Amparo com 80 W ERP.....	106
Figura 5.26 Diagrama da Antena Diretiva Utilizada para Amparo Orientação 90°.....	107
Figura 5.27 Área de Cobertura de Amparo com os Novos Parâmetros.....	107
Figura 5.28 Diagrama da Antena Diretiva do Posto de Águas de Lindóia.....	108
Figura 5.29 Perfil de Terreno Obstruído na Radial Itapira - Águas de Lindóia.....	108
Figura 5.30 Área de Cobertura de Águas de Lindóia e a Cidade de Socorro.....	109
Figura 5.31 Diagramas de Irradiação da Antena Escolhida para a Cidade de Valinhos.....	110
Figura 5.32 Área de Cobertura de Valinhos.....	110
Figura 5.33 Esboço da Área Coberta pela Rede SFN, Canal VHF 13 D.....	111
Figura 5.34 Rodovias da Região Campinas Piracicaba. Fonte DER.....	113
Figura 5.35 Estimativa de Variação do Sinal no Trajeto entre Campinas e Piracicaba.....	113
Figura 5.36 Estimativa de Variação do Sinal no Trajeto entre Campinas e Mogi Guaçú.....	114
Figura 5.37 Estimativa de Variação do Sinal no Trajeto entre Campinas e Águas de Lindóia.....	114

Figura 5.38 Estação Geradora Principal deve ser Desligada para a Expansão da Rede SFN..... 115

Figura 5.39 Não se Desliga a Estação Geradora Principal para a Expansão da Rede SFN..... 116

Figura 5.40 Situação Ilustrativa de Araras e Mogi-Guaçu atuando em Mogi-Mirim..... 117

# Lista de Tabelas

## Capítulo 3

Tabela 3.1 Canalização para TV Digital na Faixa de VHF.....	40
Tabela 3.2 Canalização para TV Digital na Faixa de UHF.....	40
Tabela 3.3 Distribuição de Canais no Brasil.....	44
Tabela 3.4 Intensidade Mínima para Recepção com Antena Externa.....	45
Tabela 3.5 Intensidade Mínima para Recepção com Antena Interna.....	46
Tabela 3.6 Relações de Proteção do Relatório Técnico.....	48
Tabela 3.7 Critérios para Cobertura com Antena Externa de Recepção no Contorno Protegido.....	49
Tabela 3.8 Critérios para Cobertura com Antena Interna de Recepção no Contorno 1 (Urbana).....	49
Tabela 3.9 Classificação das Estações em Função de suas Características Máximas para a Faixa de VHF.....	52
Tabela 3.10 Classificação das Estações em Função de suas Características Máximas para a Faixa de UHF.....	52
Tabela 3.11 Intensidade de Campo do Contorno Protegido.....	53
Tabela 3.12 Relações de Proteção (dB) para Canais em VHF e UHF.....	53
Tabela 3.13 Relações de Proteção (dB) para Sistema ISDB-T.....	54
Tabela 3.14 Relações de Proteção (dB) Específicas para Canais em UHF.....	54
Tabela 3.15 Relações Mínimas entre Potências ERP (dB) para canais Co-localizados em VHF e UHF.....	55
Tabela 3.16 Relações Mínimas entre Potências ERP (dB) para canais Co-localizados em UHF.....	55
Tabela 3.17 Valores de Intensidade de Campo Interferente para VHF.....	56
Tabela 3.18 Valores de Intensidade de Campo Interferente para UHF.....	56
<b>Capítulo 5</b>	
Tabela 5.1 Situação de uma Rede de Retransmissão Analógica.....	82
Tabela 5.2 Distâncias aos Pontos A, B e C.....	91
Tabela 5.3 Atrasos e Intensidade de Campo.....	91

Tabela 5.4 Duração de Símbolos para o ISDB modo Terrestre.....	91
Tabela 5.5 Novos Valores de Intensidade de Campo nos Pontos A, B e C.....	96
Tabela 5.6 Contribuições de São Pedro e Piracicaba.....	97
Tabela 5.7 Distâncias entre Cidades.....	98
Tabela 5.8 Distância e Intensidade de Campo do Sinal Proveniente de Limeira.....	100
Tabela 5.9 Atrasos Relativos ao Atraso Máximo da Rede.....	116
Tabela 5.10 Pontos de Estudo.....	118

# Abreviaturas e Símbolos

8-PAM SSB	Pulse Amplitude Modulation Single Side Band
ADSL	Assymmetric Digital Subscriber Line
AM	Amplitude Modulation
Anatel	Agencia Nacional de Telecomunicações
AR	Canal de Comunicação de um Sinal com Transmissão Aérea
ARIB Satndard	Association of Radio Industries and Business Standard
ATSC	Advanced Television System Committee
AWGN	Additive White Gaussian Noise
CBT	Cota da base da Torre
COFDM	Coded Orthogonal Frequency Division Multiplex
CPqD	Centro de Pesquisa e Desenvolvimento
DAB	Digital Audio Broadcasting
DER	Departamento de Estradas e Rodagem
DFT	Diferential Fourier transform
DMB-T	Digital Media Broadcasting - Terrestrial
DVB-T	Digital Video Broadcasting - Terrestrial
DVD	Digital Video Disk
ERP	Efective Radiated Power
FCC	Federal Committee Communications
FDM	Frequency Division Multiplex
FEC	Forward Error Correction
FFT	Fast Fourie Transform
FI	Frequência Intermediária
FM	Frequência Modulada
GPS	Sistema de Posicionamento Global por Satélite
HCF	Altura do Centro de Fase da Antena
HDTV	High Definition Television
Hi-Vision	High Vision

HNMT	Altura Média Normalizada do Terreno
ICI	Inter carrier Interference
IDFT	Inverse Differential Fourier transform
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFFT	Inverse Fast Fourie Transform
IG, $\Delta$	Intervalo de Guarda
ISDB-T	Integrated Service Digital Broadcasting Terrestrial
ISI	Inter Symbol Interference
ITU-R	International Telecommunications Union- Recomendation
LCD	Liquid Crystal Display
LCF	Loop Canceller Filter
LCV	Laboratório de Comunicações Visuais
LOP	Limit of Percebility
MFN	Multi Frequency Network
NHK	Rede de TV e Instituto de Pesquisa do Governo Japonês
NTSC	National Television Standard Commitee
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplex
PAPR	Peak Average Power Ratio
PBRTV	Plano Básico de Distribuição de Canais para Retransmissão de TV em
PBTV	Plano Básico de Distribuição de Canais de TV, Geração em VHF e
PBTVA	Plano Básico de Atribuição de Canais de TV por assinatura em UHF
PBTVD	Plano Básico de Distribuição de Canais Digitais em VHF e UHF.
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
RCA	Radio Company of America
SDTV	Standard Definiton Television
SFN	Single Frequency Network
TS	Transport Stream
Ts	Tempo de duração do Símbolo
Tu	Tempo Útil do Símbolo
TV	Sistema de Televisão
UHF	Ultra High Frequency
VHF	Very High Frequency

VITS	Vertical Interval Test Signal
VSB	Vestigial Side Band
WSSUS	Wide Sense Stationary Uncorrelated Scattering
$m(t)$	Seqüência Binária
$c_n$	Sinal Complexo
$i_n$	Sinal em Fase
$q_n$	Sinal em Quadratura
$\omega_n$	Frequência Angular
$f_{(OFDM)}$	Sinal OFDM
$s_{(OFDM)}$	Sinal OFDM (Símbolo)
$f_s$	Frequência de Amostragem
$i'_n$	Componentes do sinal OFDM
$\Omega_n$	Frequência Angular Digital
$t_m$	Intervalo de Tomada de Amostras
$t_s$	Duração do Símbolo OFDM de Entrada
$r_m$	Sinal Recebido
$C'i$	Vetor Recebido
$x_s(n)$	Número de Amostras do Símbolo OFDM $T_s$ com Intervalo de Guarda
$N$	Número de Portadoras
$N_s$	Número de Amostras do Intervalo de Guarda $\Delta$
$\Delta$	Intervalo de Guarda
$B_w$	Largura de Faixa
$\lambda$	Comprimento de Onda
$f_{Doppler}$	Frequência Doppler
$\theta$	Ângulo Formado entre a Frente de Onda e a Direção do Movimento
$c$	Velocidade da Luz
$f_{Tx}$	Frequência da Onda Transmitida

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 TV Terrestre Aberta; Evolução Tecnológica e Motivações

Com o advento das técnicas digitais e posteriormente com o desenvolvimento das técnicas de compressão digital muitos sistemas de telecomunicações migraram do ambiente analógico para o ambiente digital visando uma melhor qualidade de serviço ou um melhor aproveitamento do espectro de frequências. Com a televisão aberta não foi diferente, entende-se por televisão aberta a televisão cujo sinal é recebido pelo ar gratuitamente em contraposição à televisão fechada cujo sinal é codificado e recebido mediante pagamento de uma assinatura, por exemplo.

Após a implantação da TV a cores pela RCA nos Estados Unidos da América no padrão NTSC, o formato geral da TV manteve-se quase inalterado até os nossos dias, sendo que um aparelho de TV fabricado naquela época é compatível com o sinal analógico transmitido hoje.

Ainda nos Estados Unidos da América, sofrendo forte influência do cinema com seu sistema *WIDE SCREEN<sup>tm</sup>*, a televisão de alta definição HDTV mostrou-se como sucessora natural da velha TV analógica, já na Europa devido à escassez de canais, a TV digital em definição padrão ou *standard* parece até o momento, ser a escolhida para substituir a TV analógica porque na mesma largura de banda de um canal analógico pode-se ter até quatro programas diferentes.

No caso específico da televisão aberta, a digitalização está fortemente relacionada com a melhoria do sinal recebido almejando-se a recepção da televisão de alta definição e tendo como possibilidade alternativa, o aumento no número de programas no mesmo canal. Porém outras vantagens como a maior facilidade para integração e convergência faz da digitalização uma poderosa ferramenta para criação de novos serviços sendo este o grande desafio imposto aos engenheiros do século 21.

### 1.1.1 Elementos Básicos de TV e Percepção Visual

O sistema de TV baseia-se na Amostragem Temporal, onde a imagem é dividida em quadros ou *frames* seqüenciais ao longo do tempo, e na Amostragem Espacial, onde a imagem sofre uma varredura em linhas horizontais, ao longo das quais é feita a escala de luminosidade de uma determinada cena. O sinal resultante no tempo, proporcional à luminosidade de cada ponto da linha forma o sinal de vídeo.

Quando o rádio reinava soberano, sem a existência da TV, era comum a expressão ‘ao pé do rádio’ que nada mais era do que escutar o programa de rádio bem próximo ao aparelho, principalmente se o programa fosse um folhetim diário. Com o surgimento da TV era importante que se notasse o rosto de uma pessoa na tela como se ela estivesse no ambiente e novamente seguindo a indústria cinematográfica chegou-se à relação de aspecto utilizada no cinema naquela época de 4:3 sendo quatro, a dimensão largura e três, a dimensão altura para a imagem de TV. Logo concluíram que a imagem de TV deveria compreender um ângulo de cerca de 10 a 11 graus no sentido horizontal e 8 graus no sentido vertical, baseada na acuidade visual.

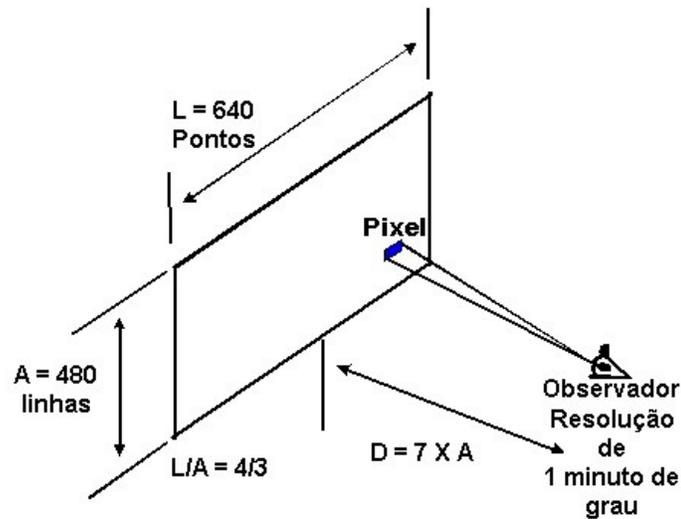


Figura 1.1. Relação de Aspecto 4:3

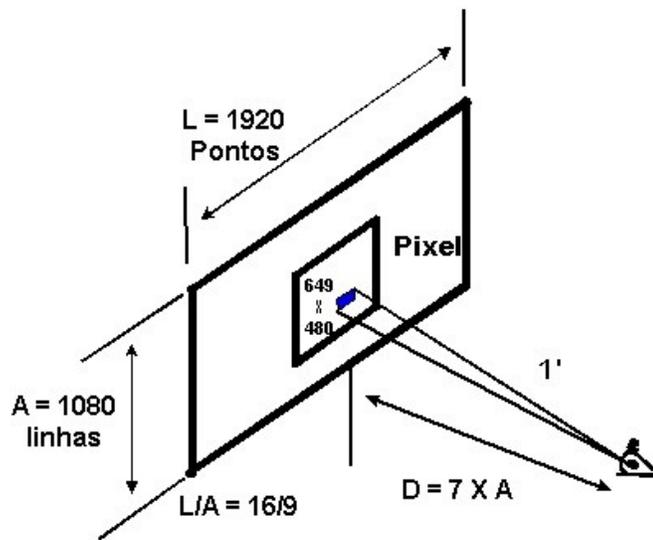


Figura 1.2 Relação de Aspecto 16:9

Tomando-se a acuidade visual humana como sendo da ordem de 1 minuto de grau, concluíram que a imagem poderia ser representada por um conjunto de aproximadamente 480 X 640 elementos de imagem ou pixels, de *picture elements*. A apresentação da imagem seqüencialmente também deve ser maior que 20 imagens por segundo para que se possa ter a sensação clara de movimento e para se evitar a sensação de cintilação, ou flutuação de luminosidade da imagem como acontecia no cinema mudo, assim sendo são necessárias de 50 a 60 imagens por segundo. Naquela época para se evitar interferências com a rede

elétrica, adotou-se 60 imagens por segundo onde a rede era de 60 Hz (Brasil, EUA, Japão, Canadá, etc.) e cinquenta imagens por segundo onde a rede era de 50 Hz (Europa, África, Ásia resto da América Latina, etc.).

Com o passar do tempo novos conceitos foram surgindo, dentre eles o conceito de Alta Definição que está relacionado ao sistema *Hi-Vision* japonês que seria capaz de proporcionar uma nova experiência visual ao telespectador, tentando se aproximar da experiência sentida diante da tela larga do cinema. Estes estudos levaram à adoção de uma imagem com proporções de 16:9, dimensionada para visualização sob um ângulo horizontal de 30 graus, que se chamou *Hi-Vision*. Este formato, que hoje é conhecido como HDTV ou TV de alta definição, aproveita melhor o material cinematográfico disponível nesta proporção e abrange parte do campo de visão periférica do observador completando o ângulo visual aproximado de 10 graus da TV convencional, que cobre a chamada visão central do observador. Então, a visão central, mais sensível a detalhes e cores, foi complementada com a visão periférica que possui maior sensibilidade ao movimento, e contribui também para a sensação de equilíbrio. O formato para HDTV foi padronizado em 1080 linhas por 1920 pixels, com a proporção de 16:9. O critério de resolução visual do formato HDTV é o mesmo da TV convencional onde cada elemento de imagem ocupa um ângulo de 1 minuto de grau sendo que a diferença entre os dois formatos é essencialmente o maior ângulo de visualização da imagem, 30 graus na horizontal para o HDTV. Convém lembrar que a proporção 16:9 também foi escolhida por manter compatibilidade com a proporção 4:3.

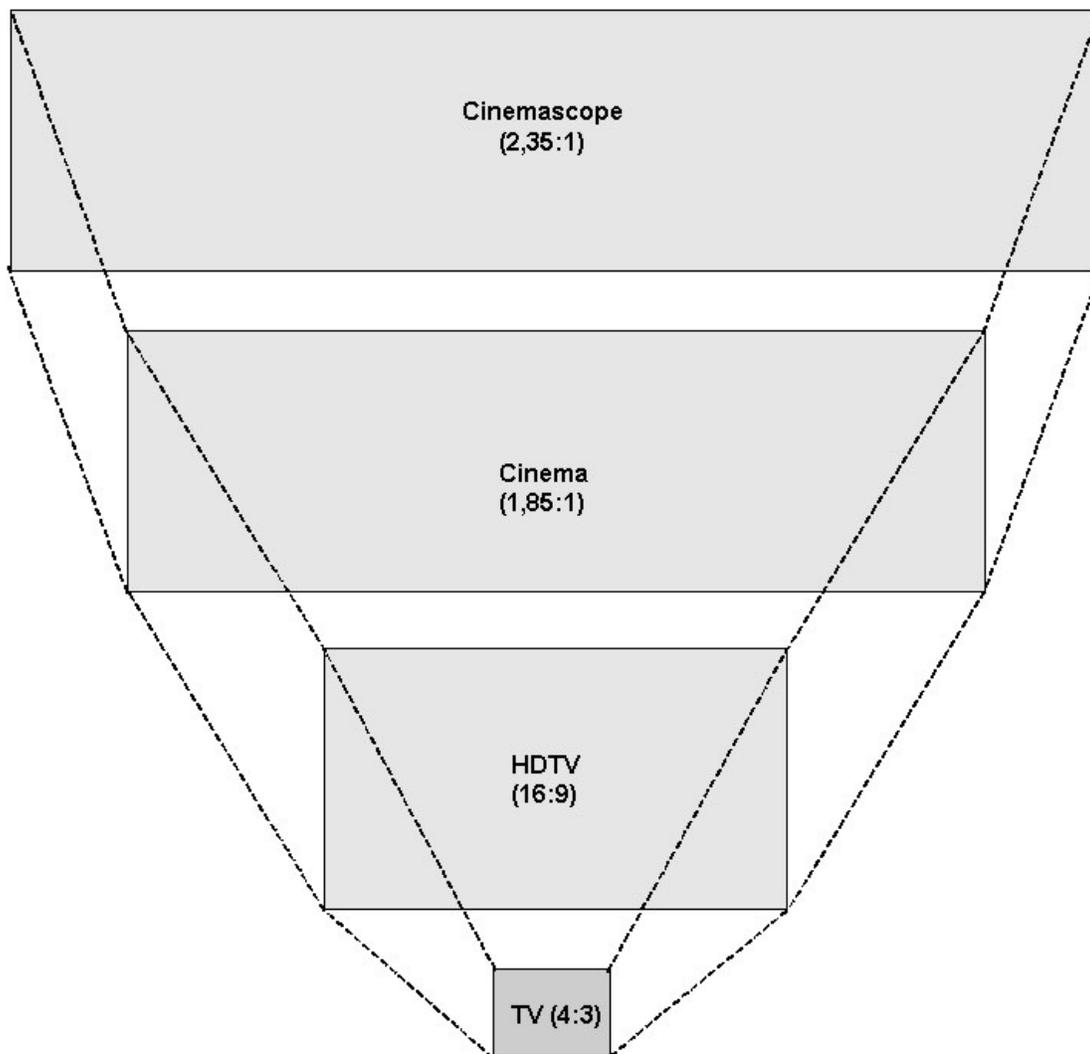


Figura 1.3 Comparação entre formatos de tela utilizados em TV convencional, HDTV, Cinema e Cinemascope

Na figura 1.3 são mostradas as proporções das telas usadas na TV convencional até a tela de cinemascope onde a idéia é a imersão do observador na cena que está sendo exibida. No formato de cinemascope a tela apresenta uma curvatura que auxilia na sensação de imersão da cena [1].

### 1.1.2 Ocupação Espectral, Entrelaçamento e Modulação AM Vestigial

A transmissão do sinal de TV exige a manipulação de 480 linhas por 60 imagens por segundo para o caso de 60 Hz, e se cada linha possui 640 elementos de imagem tem-se no total 18432000 elementos por segundo. O caso extremo acontece quando ocorre um elemento de imagem preto seguido de um elemento de imagem branco ao longo de uma linha e seqüencialmente de um quadro para outro, neste caso os elementos de uma espécie correspondem a  $\frac{1}{2}$  ciclo da forma de onda resultante.

A frequência máxima é:

$$f_{\max.} = \frac{1}{2} \times 640 \times 480 \times 60 = 9,2 \text{ MHz}$$

Seria uma banda muito grande para ser usada na época de implantação, logo, foi utilizada a Modulação AM Vestigial e o entrelaçamento para se contornar o problema. Na seqüência de imagens sucessivas, o conjunto das linhas pares ou ímpares é descartado, sendo que cada conjunto completo de linhas pares ou ímpares forma um campo com 240 linhas cada, e dois campos consecutivos formam um quadro completo ou *frame*. Com esta técnica a frequência máxima ficou em cerca de 4,6MHz não considerando o intervalo de apagamento, retraço e linhas de serviço como VITS *Vertical Interval Test Signal*. A banda utilizada atualmente é de 4,2MHz.

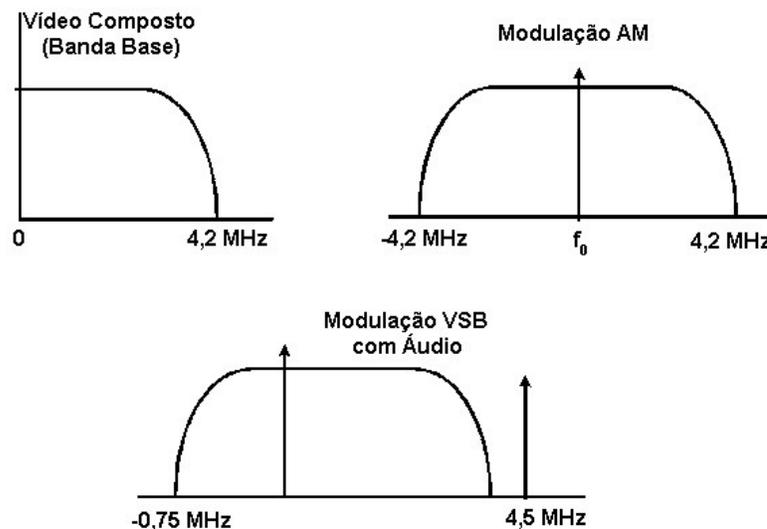


Figura 1.4 Modulação AM Vestigial

Se a modulação usada fosse AM puro, a banda seria de 8,4 MHz, então utilizando a modulação AM-VSB Vestigial que elimina, através de filtros, parte do espectro do sinal modulado, chega-se a uma largura de banda de 4,2MHz. No caso da TV, são filtradas as frequências abaixo de 750 kHz, abaixo da portadora, adaptando-se o espectro em 6 MHz. Inclui-se também uma portadora de áudio modulada em FM.

## 1.2 A Importância da Transmissão em HDTV

No dia 28 de junho de 2006, o Brasil adotou um padrão de TV digital oficial. O decreto 5.820/06 que implanta o Sistema Brasileiro de Televisão Digital Terrestre (VHF e UHF) adota como base o sistema de transmissão japonês ISDB-T.

As discussões sobre qual sistema deveria ser adotado tomaram rumos e dimensões que não se viu acontecer em nenhum outro país do mundo. Toda esta discussão causou um enorme atraso na implantação de uma TV digital aberta, que consumiu uma década de espera. Porém, a história da TV aberta pode ensinar algumas lições que devem ser levadas em consideração porque simplesmente obedecem à ordem natural das coisas.

É o caso da transmissão em HDTV, que na opinião do autor deste trabalho é a alavanca motriz de toda a TV digital. Assim foi na evolução do rádio para TV, da TV para a TV colorida e certamente será da TV colorida analógica para a TV digital HDTV na relação de aspecto 16:9. O telespectador sempre procurou melhor qualidade, isso é natural do ser humano e independe de classe social, e como já dito antes, embora o país ainda não tenha um sistema de TV digital oficial, nota-se que as vendas dos aparelhos de TV de plasma ou LCD, *Liquid Crystal Display*, aumentam dia a dia numa demonstração de que o telespectador está atento e receptivo a novidades. É óbvio que o preço é um fator determinante, assim como a situação econômica do país, mas assim também o foi com a TV colorida, que independentemente destes fatos foi um sucesso. Os fabricantes de aparelhos eletrônicos sabem explorar muito bem este fato, citando como exemplo o caso das TV's de tela plana. Assim sendo, este trabalho estará voltado para uma transmissão aberta de TV digital em HDTV, que com absoluta certeza será o principal serviço oferecido pelas redes de TV, que realmente produzem conteúdo específico para TV aberta.

## 1.3 Convergência e Mobilidade

Os sistemas digitais podem ser integrados em camadas ou *layers* sendo que uma destas camadas pode ser comum a um ou mais sistemas de comunicação, existindo então uma convergência de sistemas.

Como exemplo, pode-se citar a TV no celular, que pode ter seu conteúdo em fluxo de dados (*data streaming*) ou em sinal próprio de TV em banda estreita, sintonizado pelo próprio receptor incorporado ao aparelho celular.

O sucesso de um serviço de comunicação está diretamente relacionado com sua capacidade de trafegar em meios diferentes com um mínimo de aumento em sua complexidade. Codificadores e decodificadores-padrão funcionam como chaves para o sucesso de novos serviços. A Televisão Digital Aberta será no Brasil assim como é no mundo, parte integrante e importante da Mídia Digital.

A questão da mobilidade citada acima, caso do telefone celular, ou em receptores de mão específicos para tal fim, é imperiosa no caso da TV digital, porque agregará novos serviços às transmissões de TV, permitindo uma evolução tanto nos meios de produção de conteúdo como tecnologicamente. Convém lembrar que a TV digital a ser implantada no Brasil deve obrigatoriamente prever a mobilidade e a portabilidade como implementação, visto que estas questões estão previstas em decreto governamental.

## 1.4 O que é canalização

Basicamente, canalização é o ato de atribuir bandas de freqüências aos serviços de telecomunicações. O mundo das telecomunicações apresenta diversos serviços destinados às comunicações entre transmissores e receptores. Assim sendo o espectro de freqüências é subdividido em diversos serviços.

Como a tecnologia usada em moduladores e demoduladores é diversificada, e ainda dentro de um mesmo sistema, está sujeita a restrições devido às características de seletividade dos receptores, tem-se de um modo geral, cada serviço usando uma determinada faixa no espectro de freqüências. Além disso, dentro de um determinado serviço, é necessária uma nova divisão deste espectro para que se possa tornar o serviço mais universal possível, tanto pelo número de usuários como pelo número de executantes do serviço.

No caso da TV aberta o sistema é de radiodifusão ou '*Broadcasting*', ou seja, um transmitindo e muitos recebendo, portanto a universalização está em se aumentar o número de executantes do serviço, provendo-se os diversos canais de TV. Logo, o serviço de TV aberta é dividido em diversos canais de

televisão que são outorgados para os executantes do serviço, no caso as geradoras de TV e recebidos pelo telespectador nos aparelhos domésticos de televisão.

Não existe no mundo uma padronização quanto ao número de canais dedicados ao serviço de TV, nem ao seu tamanho ou banda utilizada. Porém historicamente estes canais se concentram nas faixas de VHF (*Very High Frequency*) e UHF (*Ultra High Frequency*). Obedecendo-se às particularidades de cada país, foi adotado um número diferente de canais, assim como uma banda diferente por canal.

Em muitos países o uso de retransmissoras destinadas a repetir a programação de uma geradora de TV tornou-se uma prática comum, com o objetivo de se alcançar o maior número possível de telespectadores. Então, canais de TV foram destinados unicamente para a retransmissão de TV, surgindo daí a figura das retransmissoras de TV em conjunto com as geradoras de TV. Resumindo, passaram a existir as geradoras de TV que geram programação, aqui significando conteúdo, e as retransmissoras de TV que não geram programação e somente retransmitem o conteúdo.

Segundo a legislação adotada no Brasil as geradoras são as entidades que geram o conteúdo da programação e as retransmissoras seriam para repetir este mesmo conteúdo visando aumentar a área de cobertura. No Brasil, existem geradoras de TV que não geram continuamente sua própria programação, sendo que retransmitem o conteúdo de uma outra geradora e eventualmente inserem algum conteúdo diferente durante uma pequena parte do tempo.

Isso acontece por diversos motivos, mas um motivo importante é o custo de produção de programas de TV, que demanda altos investimentos em pessoal e equipamentos, e muitas vezes não apresenta o retorno financeiro desejado. Como cada geradora e retransmissora recebe um canal diferente o sistema é chamado de Rede de Frequência Múltipla ou MFN (*Multi Frequency Network*), onde o mesmo conteúdo trafega em diferentes canais. O conceito de rede da televisão atual é o exemplo de uma rede MFN, onde grandes áreas são cobertas com a mesma programação básica por um grande número de diferentes canais. Com o avanço tecnológico surgiram as modulações OFDM que possibilitaram a existência de Redes de Frequência Única ou SFN onde o conteúdo trafega em um único canal. Neste trabalho entende-se por rede SFN, um conjunto de transmissores trabalhando com o mesmo sinal, a partir de sincronismo em frequência e tempo.

## 1.6 Influência da Canalização Analógica na Canalização Digital

No Brasil para a televisão analógica é utilizada a faixa de VHF e UHF [2], sendo que a faixa de VHF contribui com 12 canais e a faixa de UHF contribui com 50 canais. Então, para o serviço de TV no Brasil,

existem 62 canais que são utilizados e reutilizados um grande número de vezes. Este mesmo conjunto de canais será a fonte para os canais que serão utilizados com o advento da TV digital, então entende-se que será dobrado o número de canais hoje utilizado, visto que para cada canal analógico haverá seu correspondente digital enquanto ambos sistemas digital e analógico estiverem simultaneamente em funcionamento.

Como o planejamento analógico carrega uma excessiva troca de canais, devido a limitações de interferências entre os mesmos, este péssimo legado passará para o sistema digital que apresenta um número menor de restrições de interferência, no caso somente três. Portanto a metodologia de pareamento entre canais analógicos e canais digitais utilizada, transfere para o conjunto de canais digitais viabilizados o problema da excessiva troca de canais que existe na canalização analógica.

A base deste trabalho consiste na idéia de se utilizar um único canal para a retransmissão de sinais de TV que tenham o mesmo conteúdo, caso que ocorre na maioria das redes de retransmissão de TV das emissoras geradoras de programação. Assim procedendo, o conjunto de todos os canais, que são destinados à retransmissão, viabilizados no plano digital já aprovado, teria seu número enormemente reduzido, aproveitando-se melhor o espectro de frequências, aproveitando-se melhor as vantagens da tecnologia COFDM e rompendo com o legado da canalização analógica.

## 1.7 Retransmissão de Sinais

As retransmissoras são destinadas à extensão da cobertura das geradoras de TV e ao atendimento de regiões de sombra, tendo seus canais estabelecidos pela ANATEL no Plano Básico de Distribuição de Canais para Retransmissão de Televisão em VHF e UHF, sendo este plano chamado de PBRTV. As redes de emissoras no Brasil com mesma programação principal abrangendo geradoras e retransmissoras possuem as seguintes características básicas:

- a) Redes com geração geograficamente distribuída e penetração nacional como as redes Globo, SBT, Record e Bandeirantes;
- b) redes com geração centralizada e penetração nacional como as redes Vida e Rede TV;
- c) redes com geração centralizada e penetração regional como a rede Cultura, além de um número de estações independentes em geral com caráter educativo ou comunitário e com penetração estritamente local que geralmente não possuem redes de retransmissão.

No caso das redes Globo, SBT, Record e Bandeirantes, existem as geradoras chamadas “cabeças de rede”, que geralmente se localizam em São Paulo e Rio de Janeiro e que são as responsáveis por produzir

a maior parte do conteúdo de programação que será exibido em todo território nacional. Esta programação será recebida no interior pelas geradoras chamadas de “afiliadas”, estas por sua vez inserem um novo conteúdo de programação durante um período de tempo limitado.

As geradoras afiliadas então retransmitem este conteúdo através de sua rede de retransmissoras terrestres cobrindo assim sua área de atuação. Por força de legislação as retransmissoras não poderiam gerar conteúdo de programação, logo sua programação seria idêntica à programação da geradora principal, porém com o passar do tempo esta regra foi sendo esquecida e devido a vários interesses comerciais muitas retransmissoras outorgadas passaram a exibir durante certo intervalo de tempo uma programação deferente.

Em maio de 2005, o Conselho Diretor da Anatel aprovou o plano de canalização de canais digitais para TV, sendo que o plano garante canais digitais para as seguintes entidades:

- a) todas as geradoras de TV instaladas até a presente data;
- b) as retransmissoras situadas em todas as localidades com mais de 100 mil habitantes; e
- c) as retransmissoras em localidades de qualquer tamanho situadas a dois quilômetros de um centro urbano onde exista geradora (colocalizadas). Este plano é chamado de PBTVD, Plano Básico de Distribuição de Canais Digitais em VHF e UHF.

Embora os canais já tenham sido disponibilizados no plano, depende de viabilização por parte das geradoras executantes do serviço e outorga por parte do Ministério das Comunicações. Como exemplo uma cidade com 80.000 habitantes que seja servida somente por canais de retransmissão, não foi contemplada a princípio com canais digitais.

Estas redes de retransmissão abrangem extensas áreas, com várias cidades dentro de sua cobertura e em cada uma destas cidades a transmissão de um mesmo conteúdo de programação se dá em canais diferentes. Especificamente para estes casos, e com o advento da TV digital, principalmente baseada em modulação OFDM, este trabalho propõe a utilização de redes SFN, utilizando um único canal para a cobertura de todas as cidades de uma rede de retransmissão onde trafega o mesmo conteúdo de programação.

## 1.8 Contribuições e Organização do Trabalho

Esta dissertação defende a tese de que para a rede de estações retransmissoras de uma estação geradora de TV terrestre aberta, sendo o sistema digital baseado principalmente em modulação COFDM (*Coded Orthogonal Frequency Division Multiplex*) será mais racional a utilização de uma rede SFN

(*Single Frequency Network*). A partir disso, serão obtidos ganhos no aproveitamento do espectro de frequências, uma maior agilidade e rapidez na implantação da TV Digital no interior do país, longe das grandes metrópoles e capitais, replicação da área de cobertura analógica existente, melhor ambiente para a recepção móvel, e menor custo de implantação do sistema.

O trabalho foi dividido da seguinte forma:

### **Capítulo 1: Introdução**

Este capítulo situou os fatos que conduziram os trabalhos com sua evolução e suas motivações destacando a transição da TV analógica para a TV digital culminando na importância da programação em HDTV, comentando a convergência e a mobilidade, explicando o início da canalização, influência da canalização analógica na digital, e retransmissão de sinais.

### **Capítulo 2: Modulação COFDM**

Este capítulo apresenta a modulação OFDM partindo desde a FDM até a definição da COFDM, salientando as vantagens da COFDM para as Redes de Frequência Única, incluindo os ganhos para uma possível recepção móvel. Nesta parte, comenta-se também sobre as desvantagens e dificuldades de sistemas monoportadoras, como o VSB, para as Redes de Frequência Única.

### **Capítulo 3: Plano Básico de TV Digital (PBTVD)**

Este capítulo apresenta o PBTVD sua concepção e propostas. Comenta-se brevemente sobre como são considerados os Contornos de Proteção, assim como as principais relações de proteção entre canais interferentes. Este plano foi concebido prevendo-se o uso de sistemas monoportadora no caso ATSC e multiportadoras COFDM, no caso DVB-T e ISDB-T. Comenta-se sobre o reuso de frequências, canalização utilizando SFN, e a proposta de complementação do plano com o uso da SFN Regional.

### **Capítulo 4: Redes de Frequência Única (SFN)**

Nesta parte é abordada a teoria de Rede de Frequência Única, juntamente com os parâmetros utilizados em sua implementação. Apresenta também alguns modos de sincronização do receptor, formas

de envio do sinal, Filtro de Cancelamento de Realimentação LCF (*Loop Canceller Filter*) e as vantagens diante de canais que variam rapidamente no tempo.

### **Capítulo 5: Testes e Simulações**

Este capítulo apresenta a simulação de uma Rede de Frequência Única baseada em uma rede de retransmissão analógica real, simulando um caso que certamente irá ocorrer num futuro próximo quando os radiodifusores estiverem viabilizando suas redes de retransmissão terrestres para o sistema digital. Partindo de um modelo de implantação e escolhida uma região de implantação, foram realizados testes e simulações, sempre se realizando a comparação com a rede MFN analógica existente, para se levantar a viabilidade de sua replicação através do sistema de rede SFN.

### **Capítulo 6: Conclusões e Trabalhos futuros**

Após a apresentação dos testes realizados, são feitas as conclusões do uso das Redes de Frequência Única para o serviço de retransmissão de sinais de TV digital, comentando-se sobre os possíveis trabalhos futuros como a operação com programações diferentes, uso de Filtro de Cancelamento de Realimentação e custos de implantação.

## Capítulo 2

### Modulação OFDM

#### 2.1 Evolução FDM, OFDM e COFDM

Com o advento das técnicas digitais os sistemas de telecomunicações puderam migrar de sistemas de portadora única SCM (*Single Carrier Modulation*) para sistemas MCM (*Multiple Carrier Modulation*). Na técnica SCM os símbolos digitais são transmitidos serialmente, significando que a duração da janela temporal associada a cada símbolo é muito pequena para altas taxas de transmissão de dados. Já na técnica MCM, cada símbolo pode ter seu período de transmissão aumentado para que seja maior que a duração dos distúrbios de ruído, inclusive maior que o intervalo de dispersão do canal.

A evolução da família de siglas FDM marcou profundamente as telecomunicações, e teve um rápido desenvolvimento após a segunda guerra mundial. FDM (*Frequency Division Multiplexing*) é a multiplexação em frequência para a transmissão de múltiplos canais, ou seja, neste sistema é utilizada uma banda de frequência bem maior do que a necessária para cada canal individual. O conjunto de canais que ocupam esta banda possui cada um sua própria portadora que se sobrepõe no tempo, mas pode ser individualmente recuperada por não se sobreporem em frequência. Convém lembrar que, neste caso, existem diversas portadoras transmitindo múltiplos canais, e por este motivo o sistema pode ser classificado como sistema de transmissão multiportadoras. Esta técnica vem sendo empregada desde a

década de 50 em telefonia analógica para a transmissão de um grande número de canais via satélite ou por microondas.

OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) é a evolução do FDM na qual as portadoras são ortogonais entre si, podendo, então, serem recuperadas individualmente, mesmo na ocorrência de superposição em frequência [3]. Convém lembrar que na técnica FDM, usada na telefonia, por exemplo, cada portadora representa um canal telefônico independente dos demais. Já no OFDM, os dados digitais do mesmo sinal digital são transmitidos pelas diversas portadoras moduladas formando o símbolo.

Ainda utilizando o exemplo da telefonia convencional, onde cada portadora exige um modulador-demodulador e os filtros que evitam interferência entre canais, fica claro que esta técnica de FDM não poderia ser utilizada para a transmissão de TV digital de alta definição, visto que se necessitam de milhares de portadoras para transmitir o sinal. Porém, a solução foi alcançada paulatinamente quando em princípio Chang [4] demonstrou ser possível a transmissão de vários canais limitados em banda sem causar interferência entre portadoras ICI (*Inter Carrier Interference*) e interferência entre símbolos ISI (*Inter Symbol Interference*). Depois foi utilizada a transformada Discreta de Fourier DFT, que melhorou o desempenho da modulação e da demodulação, sendo o artigo chave de autoria de Erbert e Weinstein [5]. Nesse artigo, a fim de se evitar a ICI e ISI, foi utilizado um espaço entre os símbolos, sendo que este espaço vazio se chamou “espaço de guarda” e, hoje, intervalo de guarda. A ortogonalidade ainda não estava perfeita, fato que foi alcançado por Ruiz e Peled [6] que introduziram o conceito de prefixo cíclico, ou extensão cíclica resolvendo o problema da ortogonalidade.

Uma vez resolvido o problema da ortogonalidade o uso de milhares de portadoras ficou possível, pois utilizando os recursos da Transformada de Fourier é possível gerar e modular todas as portadoras simultaneamente. Logo, na recepção não existe a necessidade de se proceder a filtragem das portadoras para sua separação, sendo utilizada em seu lugar uma amostra do sinal recebido para aplicação da Transformada Direta de Fourier.

Em comparação à técnica de modulação monoportadora que apresenta muita sensibilidade a ruído impulsivo, desvanecimento seletivo e ecos, causados por múltiplos percursos, as técnicas de multiportadoras são praticamente imunes a estes fenômenos, se os mesmos apresentarem uma duração no tempo menor que a duração da transmissão de cada símbolo. Mas como não existe perfeição absoluta no mundo real as técnicas multiportadoras OFDM são sensíveis a interferências senoidais, erros de fase e de frequência.

A tecnologia OFDM está sendo usada nos sistemas de TV Digital DVB-T (*Digital Video Broadcasting – Terrestrial*), DMB-T (*Digital Multimedia Broadcasting – Terrestrial*), ISDB-T, (*Integrated Service Digital Broadcasting Terrestrial*) e em outras aplicações como o DAB (*Digital Audio*

Broadcastin)', ADSL (Assymmetric Digital Subscriber Line) e padrões de redes sem fio como IEEE802.11, entre outras.

## 2.2 Princípios Básicos da Modulação OFDM

A modulação OFDM está fartamente e muito bem documentada na literatura como [4], [6], [5], [7], [8], [9], [10], [11] entre muitas outras referências. Este capítulo então analisará somente os pontos básicos relativos às vantagens do sistema em relação ao multipercurso procurando enfatizar o aspecto do intervalo de guarda.

A Figura 2.1 mostra o modulador OFDM básico em blocos.

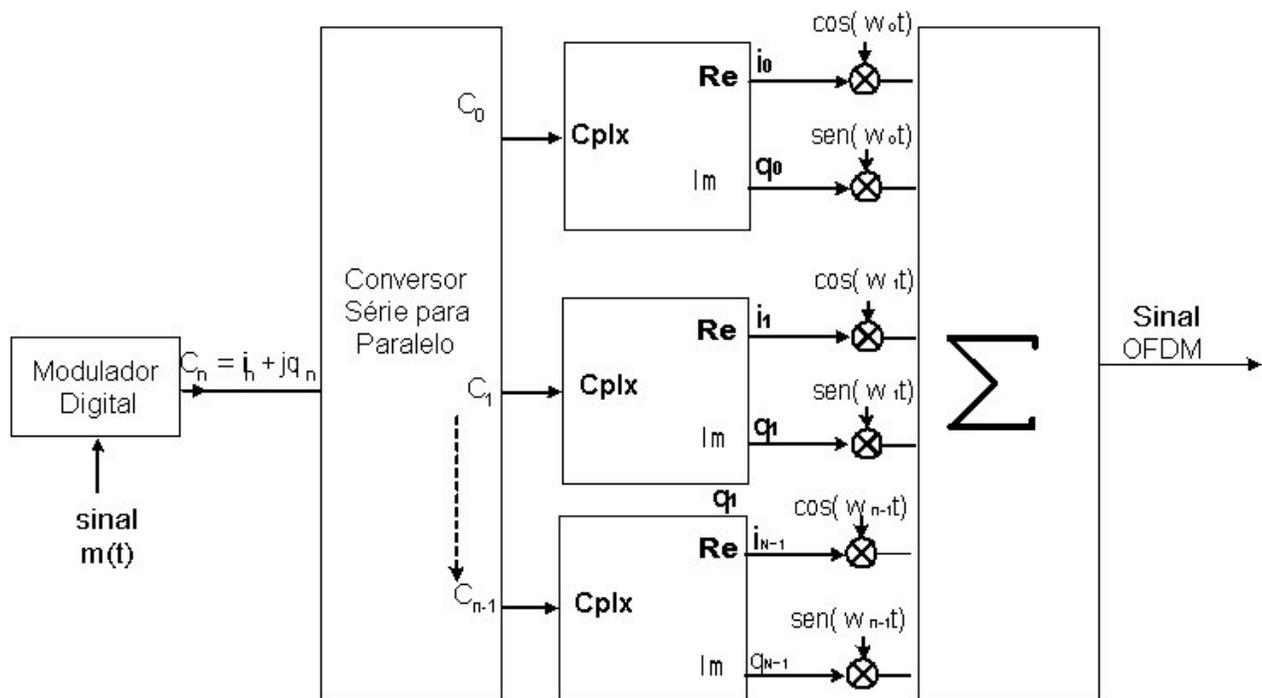


Figura 2.1 Modulador OFDM Básico

Onde  $m(t)$  pode ser uma seqüência binária que se deseja transmitir, e  $(c_n = i_n + jq_n)$  é o sinal complexo mapeado nos sinais  $(i_n)$  em fase e  $(q_n)$  em quadratura. A seguir o conversor série paralelo transforma o sinal em  $N$  feixes de símbolos complexos paralelos que modulam as subportadoras complexas. Acontece então a modulação da função co-seno de frequência angular  $w_n$  pela parte real e a função seno de  $w_n$  sendo modulada pela parte imaginária. O espaçamento entre as subportadoras é igual ao inverso do tempo do símbolo OFDM sendo que o conjunto das  $N$  subportadoras adjacentes é ortogonal.

O equacionamento do sinal OFDM é resumidamente mostrado a seguir:

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

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

$$f_{OFDM}(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \Re \{ i_n \cos(w_n t) - ji_n \text{sen}(w_n t) + jq_n \cos(w_n t) + q_n \text{sen}(w_n t) \}$$

onde  $\text{Real}\{.\}$  corresponde à parte real,  $i_n \cos(w_n t) + q_n \text{sen}(w_n t)$ . Logo o sinal OFDM pode ser expresso por :

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

Decorrido o tempo do símbolo OFDM em 'T' segundos o valor de amplitude de cada subportadora é atualizado com os dados no próximo símbolo. Convém lembrar que para o sistema OFDM todos os  $N$  osciladores complexos do transmissor e do receptor necessariamente devem estar em fase. Se o número de subportadoras no sistema crescer muito, a dificuldade em se obter sincronismo entre os osciladores aumenta proporcionalmente, aumentando a complexidade da implementação.

A demodulação OFDM é realizada de acordo com a Figura 2.2.

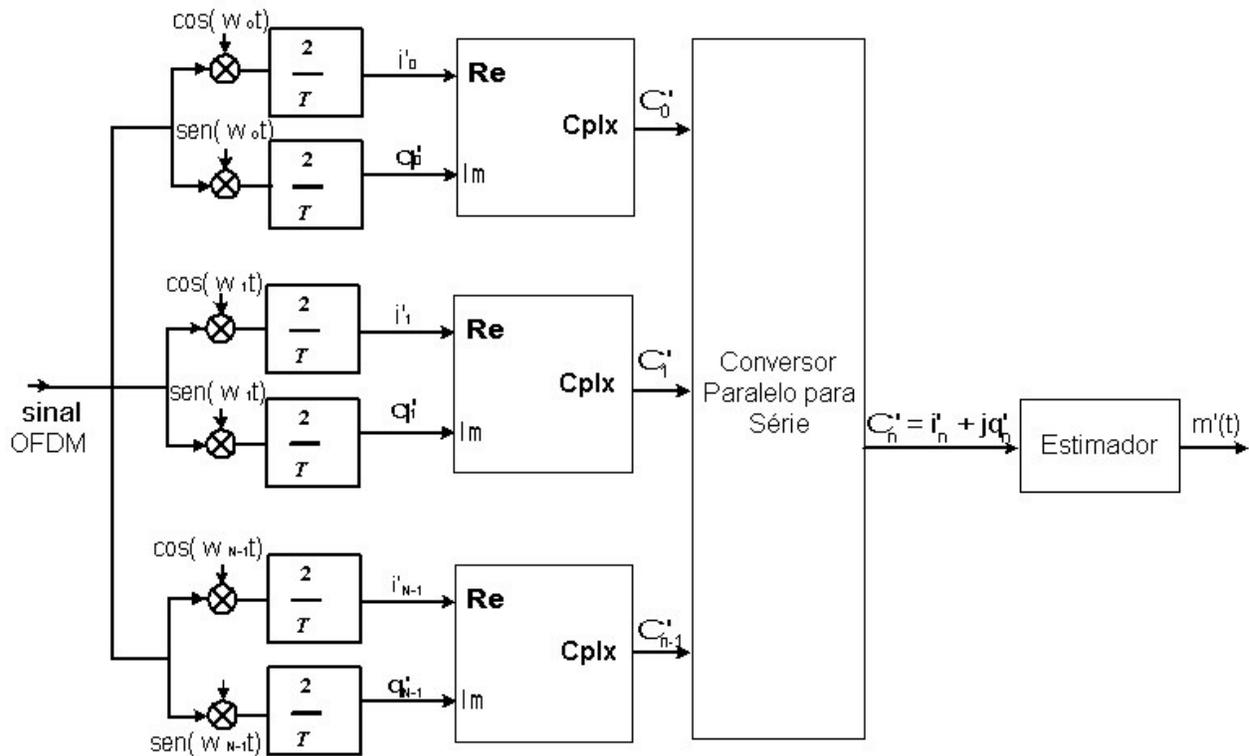


Figura 2.2 Demodulador OFDM

Considerando um canal ideal sem ruído, sem distorção tem-se uma detecção sem erros porque como já mencionado anteriormente as subportadoras são ortogonais entre si, não existindo interferências ICI entre as N subportadoras recebidas. Uma vez que todas as subportadoras possuem o mesmo número inteiro de ciclos dentro do intervalo do símbolo em 'T' segundos, a detecção das componentes  $i'_n$  pode ser representada por:

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

Ilustrando a recepção para a componente  $i'_0$  tem-se as seguintes equações:

$r(t) = s_{\text{OFDM}}(t)$  considerando o canal ideal

$$i'_o = \frac{2}{T} \int_0^T \sum_{n=0}^{N-1} [i_n \cos(\omega_n t) + q_n \text{sen}(\omega_n t)] \cdot \cos(\omega_0 t) dt$$

$$i'_o = \frac{2}{T} \int_0^T \sum_{n=0}^{N-1} i_n \cos(\omega_n t) \cdot \cos(\omega_0 t) dt + \underbrace{\frac{2}{T} \int_0^T \sum_{n=0}^{N-1} q_n \text{sen}(\omega_n t) \cdot \cos(\omega_0 t) dt}_0$$

$$i'_o = \frac{2}{T} \int_0^T i_0 \cos(\omega_0 t) \cdot \cos(\omega_0 t) dt + \underbrace{\frac{2}{T} \int_0^T \sum_{n=0}^{N-1} i_n \cos(\omega_n t) \cdot \cos(\omega_0 t) dt}_0$$

$$i'_o = \frac{2i_0}{T} \int_0^T \cos^2(\omega_0 t) dt = i_0 \quad (2.3)$$

Isto se repete para todas as componentes do sinal  $r(t)$ , uma vez que todas as subportadoras tem um número inteiro de ciclos no intervalo de duração do símbolo. Para que não ocorra a perda de ortogonalidade entre as portadoras o sincronismo entre a transmissão e a recepção é essencial. Várias técnicas são empregadas para garantir o sincronismo entre os osciladores de transmissão e os de recepção. Uma delas consiste em utilizar portadoras 'piloto' que carregam um sinal de referências para o receptor. Nas técnicas atuais as portadoras piloto não transportam conteúdo do sinal a ser transmitido, mas ajudam o receptor a sincronizar a fase e a frequência dos osciladores. Uma estimação do canal também pode ser realizada através das portadoras piloto. As portadoras, não carregando informação, isto é, não sendo moduladas com informação, fornecem em suas amplitudes para o receptor, uma idéia da atenuação oferecida pelo canal em suas respectivas frequências. Fazendo-se uma interpolação entre as amplitudes das portadoras piloto, estima-se a resposta em frequência do canal. A Figura 2.3. mostra uma situação no

domínio da frequência. Após a estimativa do canal, o receptor pode equalizar o sinal recebido no domínio da frequência.

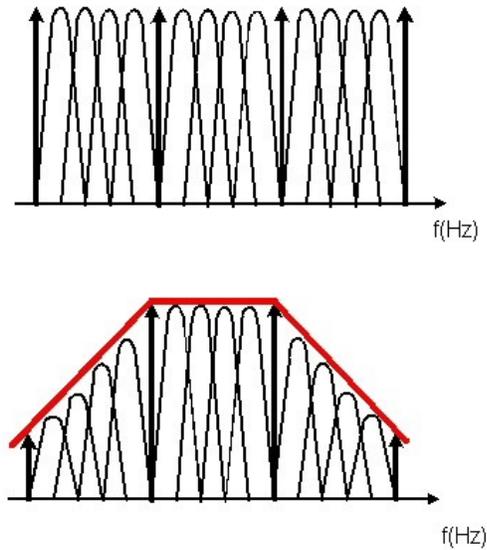


Figura 2.3 Estimação da Resposta em Frequência do Canal entre Sinal Transmitido e Recebido

Como já mencionado anteriormente se o número de portadoras for muito grande este método pode se tornar inviável, logo com a evolução do sistema percebeu-se que o sinal OFDM poderia ser analisado como uma série de Fourier [6] conforme pode ser visto na Equação 2.4 que é igual à equação 2.1 ( $f_{OFDM}(t) = s_{OFDM}(t)$ )

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

Nesta equação os coeficientes  $i_n$  e  $q_n$  podem representar os coeficientes de bases ortogonais  $\cos(w_n t)$  e  $\text{sen}(w_n t)$  em analogia a uma série de Fourier de N elementos e coeficientes  $i_n$  e  $q_n$ . Amostrando o sinal OFDM e analisando a Equação 2.4 no domínio do tempo e adotando uma taxa de amostragem conforme Equação 2.5.

$$f_s = \frac{1}{T_s} = R_s \quad (2.5)$$

onde  $f_s$  é a frequência de amostragem, e colocando sob nova forma a Equação 2.4 vem a Equação 2.6,

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

$$m = 0, 1, 2, 3, \dots, N - 1$$

onde  $\Omega_n$  é a frequência angular digital da n-ésima subportadora amostrada sendo definida como a Equação 2.7

$$\Omega_n = 2\pi f_n \quad (2.7)$$

Em banda básica a frequência da primeira portadora é nula  $f_0 = \text{zero}$  [Hz] e as frequências da subportadoras são vistas na Equação 2.8,

$$f_n = \frac{n}{T} \quad (2.8)$$

No intervalo  $t_m$  são tomadas as amostras do sinal OFDM conforme Equação 2.9

$$t_m = m t_s \quad (2.9)$$

onde a duração do símbolo OFDM de entrada é  $t_s$  conforme Equação 2.10

$$T = N t_s \quad (2.10)$$

Assim pode-se representar o sinal OFDM amostrado em banda básica como a Equação 2.11:

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

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

O vetor de  $N$  símbolos complexos  $c_n$  pode ser obtido através da Transformada Inversa Discreta de Fourier, IDFT (*Inverse Discret Fourier Transform*). Assim sendo, se a IDFT gera no domínio do tempo um sinal a partir do espectro de frequências, o vetor  $c_n$  pode ser considerado como o espectro de frequência do símbolo OFDM.

No sinal OFDM a simetria em relação à frequência nula não acontece porque cada componente do vetor  $c_n$  corresponde a um símbolo de dados a ser transmitido independentemente dos demais, gerando, através da IDFT, um sinal complexo onde a informação transmitida está tanto na parte real quanto na parte imaginária. Sob nova forma a Equação 2.12 mostra este fato:

$$s_{OFDM}(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \Re \{ (i_n + jq_n) \cdot [\cos(\omega_n t) - j \text{sen}(\omega_n t)] \} \quad (2.12)$$

Da Equação 2.11 somente a parte real da IDFT ( $c_n$ ) é transmitida

A partir da IDFT é importante considerar o número de pontos presentes no sinal gerado, porque como o vetor  $c_n$  contém  $N$  amostras, o sinal também possui  $N$  amostras complexas. Para que o sinal seja transmitido, deve-se interpolar a parte real das amostras geradas pela IDFT, obtendo-se assim, um sinal contínuo no tempo. A Figura 2.4 apresenta o diagrama em blocos de um modulador OFDM utilizando a IDFT.

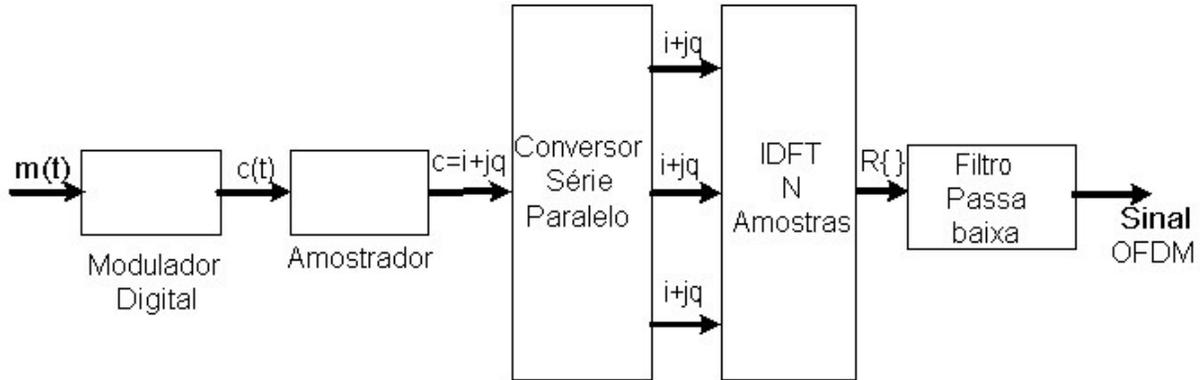


Figura 2.4 Modulador OFDM IDFT

Por sua vez a recepção do sinal é realizada através da Transformada Discreta de Fourier DFT (*Discrete Fourier Transform*). Sabe-se que a taxa de amostragem do sinal recebido deve ser duas vezes maior do que a taxa do sinal transmitido, uma vez que o mesmo contém apenas a parte real.

Sendo o sinal recebido  $r_m$  na Equação 2.13 vem:

$$r_m = r\left(\frac{t_m}{2}\right) = r\left(\frac{ts}{2}m\right) \quad (2.13)$$

Como se tem a amostragem em duas vezes o sinal transmitido, o sinal  $r_m$  é composto por  $2N$  amostras originais para o canal ideal conforme a Equação 2.14.

$$r_m = \sum_{n=0}^{N-1} \left[ i_n \cos\left(\frac{2\pi n}{2N}m\right) + q_n \text{sen}\left(\frac{2\pi n}{2N}m\right) \right] \quad (2.14)$$

Aplicando a IDFT no sinal  $r_m$  vem a Equação 2.15,

$$c'_l = \begin{cases} 2i_0 & l=0 \\ i_l + jq_l & 1 \leq l \leq N-1 \\ \text{irrelevante} & N \leq l \leq 2N-1 \end{cases} \quad (2.15)$$

$C'_i$  é o vetor recebido, ele é um vetor complexo, com o dobro do comprimento do vetor  $c_n$ , porém só as  $N$  primeiras amostras detêm informação do sinal. Somente a parte real do coeficiente  $c_0$  é recuperada, porque este coeficiente é transportado na portadora de frequência nula. A Equação 2.11 para  $n=0$  apresenta valor nulo, assim a primeira subportadora do símbolo OFDM em banda básica não transporta informação em quadratura sendo real. Na Figura 2.5 é esboçado o demodulador OFDM empregando DFT.

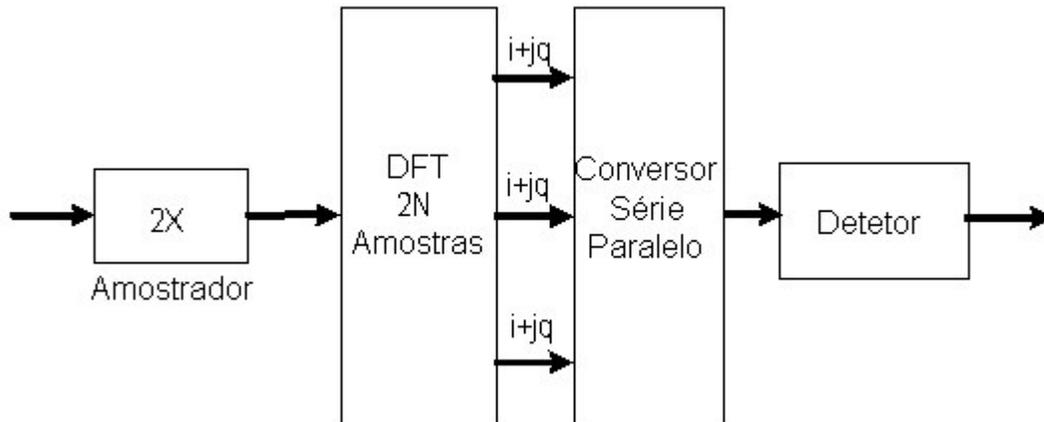


Figura 2.5 Demodulador OFDM DFT

Somente como curiosidade, porque não é o objetivo deste trabalho explorar com detalhes a modulação OFDM, encontram-se diversos esquemas de modulação e demodulação OFDM onde a parte imaginária da IDFT também é transmitida. Isto simplifica a análise e a modelagem para a simulação. A Figura 2.6 apresenta o diagrama em blocos do sistema OFDM com transmissão da parte imaginária da IDFT.

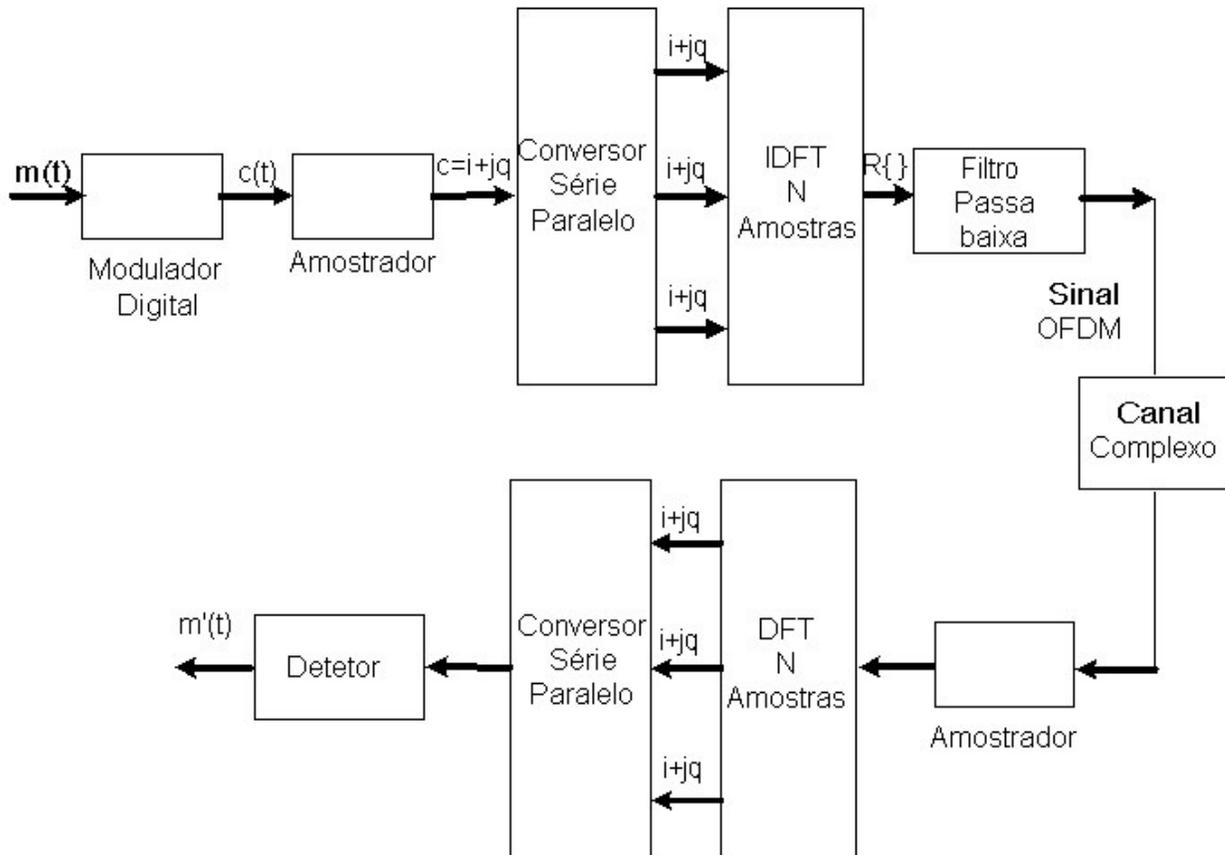


Figura 2.6 Sistema OFDM com Transmissão da parte Imaginária

Neste sistema, como não ocorre perda da parte imaginária da IDFT, não é necessário amostrar o sinal recebido com o dobro da taxa de amostragem utilizada na transmissão. A parte imaginária do coeficiente  $c_0$  também é recuperada, pois a parcela  $j q_n \cos(\omega_n t)$  da Equação 2.4 garante a transmissão do termo  $q_0$ .

Aqui já não existe o problema anterior da complexidade de um grande número de osciladores, porém a realização da IDFT na transmissão e DFT na recepção das  $N$  amostras durante o tempo do símbolo OFDM exige considerável esforço computacional, que aumenta com o aumento do número de portadoras.

Para aumentar a eficiência computacional do sistema utiliza-se o algoritmo rápido da Transformada de Fourier chamado FFT (*Fast Fourier Transform*) e sua inversa IFFT, que satisfazendo a condição da Equação 2.16 reduz o tempo de processamento.

$$N = 2^p \quad p = 1, 2, 3, \dots \quad (2.16)$$

A seguir é esboçado na Figura 2.7 um sistema OFDM que implementa IFFT e FFT.

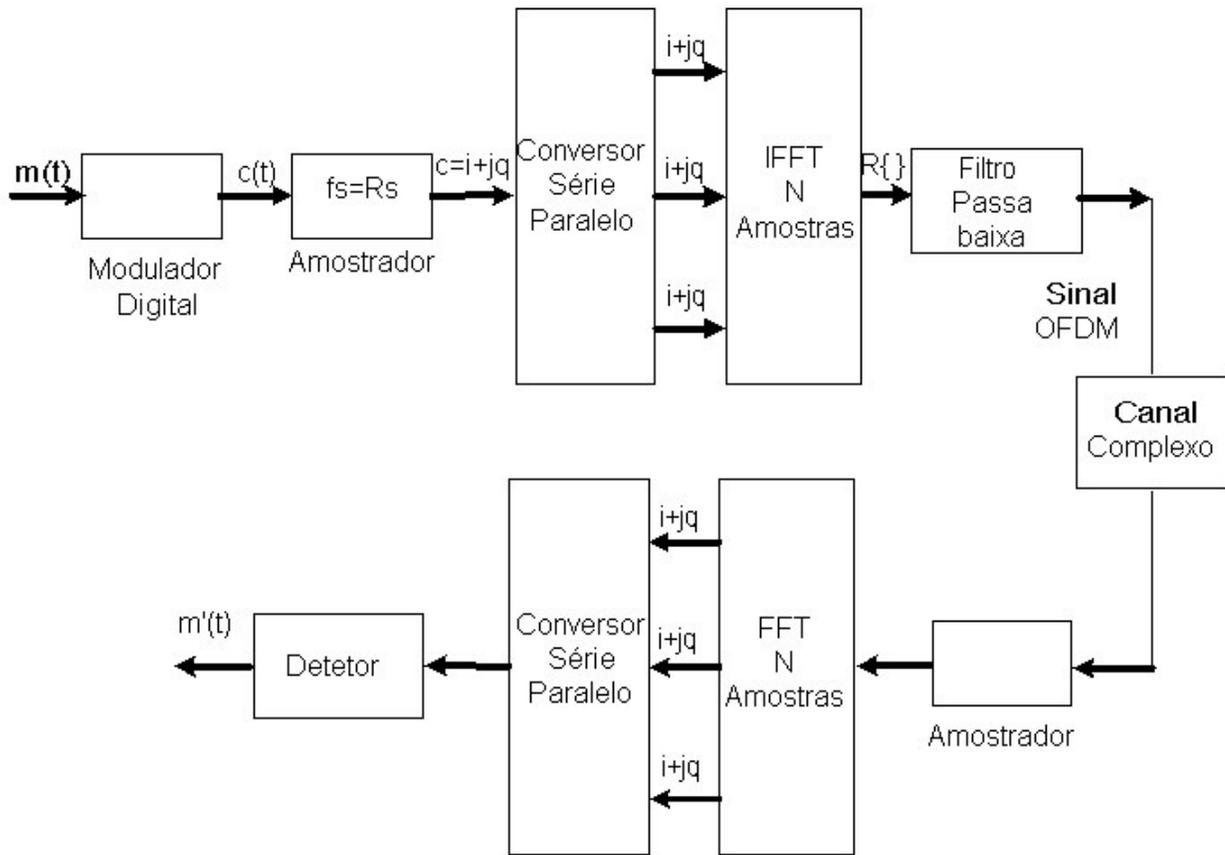


Figura 2.7 Sistema de Modulação OFDM empregando IFFT-IDFT

Hoje em dia, a maioria absoluta das implementações de sistemas OFDM, utilizam IFFT / FFT devido à sua maior eficiência computacional viabilizando a transmissão de altas taxas com elevado número de portadoras que são exigidos na transmissão de sinais de TV digital.

### 2.3 Intervalo de Guarda

Em um ambiente severo de transmissão, com multicaminhos e muita reflexão acontecendo entre o transmissor e o receptor, a ortogonalidade das portadoras do sinal recebido pode ser prejudicada. Então, após a modulação OFDM, é inserido um intervalo de guarda que consiste na extensão cíclica do símbolo OFDM. O tamanho desta extensão equivale à duração do intervalo de guarda.

O propósito do intervalo de guarda é absorver os problemas relacionados às interferências intersimbólicas, mas para que isto funcione é necessário que o tamanho do intervalo de guarda seja maior que a dispersão temporal do canal, ou seja, o atraso máximo de um sinal refletido que chega à antena deve ter uma duração menor que a duração do intervalo de guarda. A Figura 2.8 ilustra a situação do intervalo de guarda.

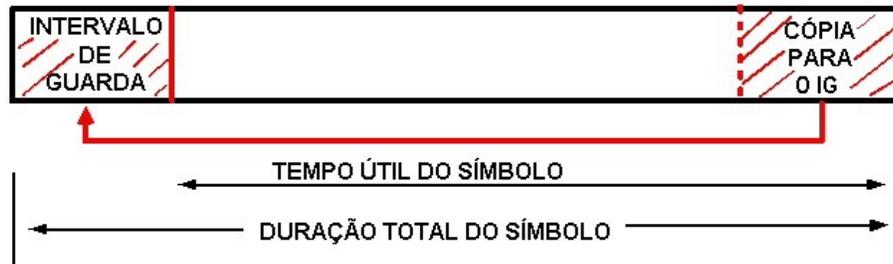


Figura 2.8 Diagrama do Intervalo de Guarda em Relação ao Símbolo OFDM

O intervalo de guarda também poderia ser constituído de um intervalo vazio [12], porém quando o canal é dispersivo o atraso de cada subportadora pode ser diferente, acarretando uma interferência intersimbólica e perda de ortogonalidade. No domínio do tempo significa que deixa de existir um número inteiro de portadoras dentro de um ciclo (parte útil do símbolo OFDM). No domínio da frequência existe o cruzamento do espectro das diversas subportadoras [13].

Para combater a ICI utilizou-se a técnica de estender o símbolo OFDM para dentro do intervalo vazio [6]. A Equação 2.17 e Figura 2.8 mostram este caso, garantindo que se a dispersão do sinal for menor que o comprimento do intervalo de guarda as subportadoras atrasadas do símbolo OFDM sempre terão um número inteiro de ciclos na parte útil do símbolo OFDM.

$$x_g(n) = \begin{cases} x(N + n), & n = -N_g, -N_g + 1, \dots -1 \\ x(n), & n = 0, 1, \dots N - 1 \end{cases} \quad (2.17)$$

onde:

$x_g(n)$  é o número de amostras do símbolo OFDM  $T_s$  com intervalo de guarda

$N$  é o número de subportadoras

$N_g$  é o número de amostras do intervalo de guarda  $\Delta$

## 2.4 Portadoras Múltiplas X Portadora Única

A televisão analógica convencional, como já foi dito, utiliza o sistema de portadora única. Nestes sistemas, é utilizada uma única portadora para transmitir seqüencialmente todos os dados através do canal de comunicação. Na TV digital, o padrão ATSC utiliza uma modulação 8-VSB semelhante à modulação 8-PAM/SSB. Sendo o sistema de portadora única, o aumento na taxa de transmissão de dados resulta em um aumento da largura de faixa ocupada pelo sinal transmitido, o que eleva a probabilidade de ocorrência do desvanecimento seletivo em freqüência.

O efeito na recepção aparece na forma de erros em rajada, que dificilmente podem ser recuperados com o uso de códigos de corretores de erros. Para solucionar este problema os sistemas monoportadora geralmente empregam equalizadores adaptativos, que determinam a amplitude e o atraso dos diversos percursos do canal, cancelando-os na recepção. Porém é uma técnica ainda complexa à medida que o multipercurso do canal aumenta.

A evolução do sistema OFDM utilizado na TV digital é chamado COFDM (*Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), onde poderosos códigos corretores de erros como Viterbi, Turbo Code, etc. podem ser empregados para aumentar a robustez do sistema frente aos problemas ocasionados pelo canal de transmissão. É sabido que a largura de faixa ocupada por cada uma das portadoras do sinal COFDM completando um total de 'N' portadoras será 'N' vezes menor que a largura de faixa ocupada pelo sinal modulado por uma única portadora como exemplo da modulação do sistema ATSC, 8-VSB.

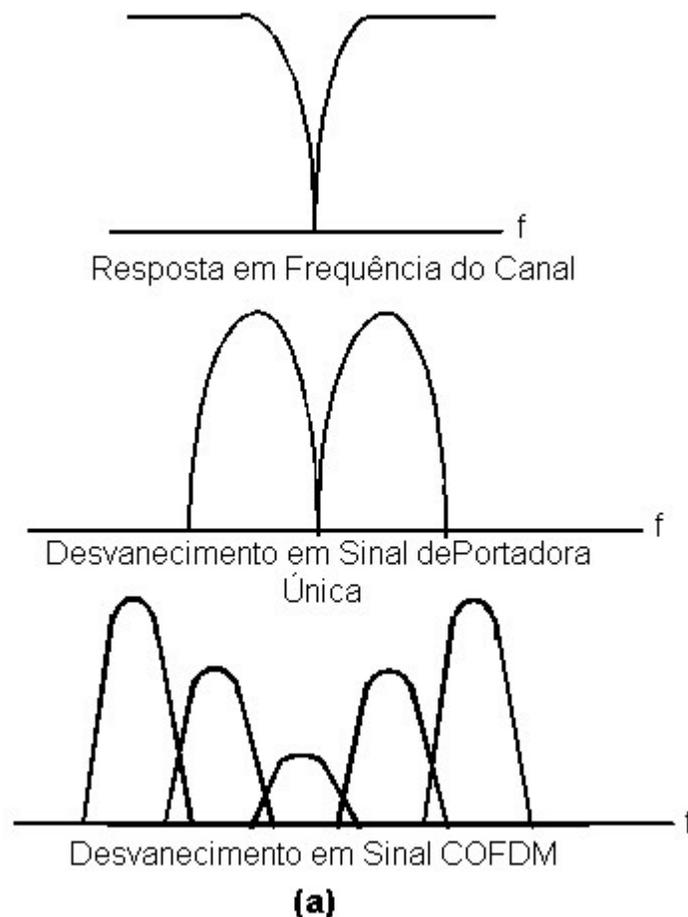
Assim, pode-se considerar o sistema COFDM como um sistema formado por 'N' subsistemas independentes, por causa da ortogonalidade das portadoras, com suas respectivas larguras de faixa que pode ser expressa pela Equação 2.18.

$$BW_{subcanal} = \frac{BW_{simbolo}}{N} \quad (2.18)$$

O sistema COFDM fica então mais imune ao desvanecimento seletivo porque a largura de faixa do sinal acaba sendo menor do que a banda de coerência do canal. Erros em rajada na recepção irão afetar todos os símbolos transmitidos quando o sistema utilizado for de portadora única. Por outro lado, no sistema de multiportadoras, são perdidos apenas os símbolos transmitidos nas portadoras que forem afetadas pelo desvanecimento seletivo. O sistema de multiportadoras ainda utiliza a técnica de entrelaçamento dos símbolos antes de os mesmos serem mapeados em N feixes de dados. Assim, evita-se

os erros em rajadas. Isto é feito para que portadoras adjacentes não transportem símbolos adjacentes, e assim o código corretor de erros atua de maneira eficaz.

No caso do desvanecimento plano, o sistema COFDM também apresenta vantagem, uma vez que para um elevado número de portadoras o tempo do símbolo tende a ser maior do que a duração do desvanecimento logo, a interferência não causa perda de símbolos. Para o sistema de portadora única, considerando uma alta taxa de transmissão a duração do símbolo é pequena, e vários símbolos são perdidos durante a ocorrência do fenômeno de desvanecimento plano, que se traduz em uma redução de potência no sinal recebido. A Figura 2.9 ilustra o desvanecimento seletivo (a) e o desvanecimento plano (b). Na Figura 2.9(b) fica clara a comparação entre o sistema de portadora única e o sistema do multiportadoras, onde se observa que o sinal de portadora única perdeu três símbolos consecutivos e o sistema de multiportadoras teve todos os seus símbolos afetados, porém de maneira pouco intensa, sendo perfeitamente possível sua recuperação no receptor.



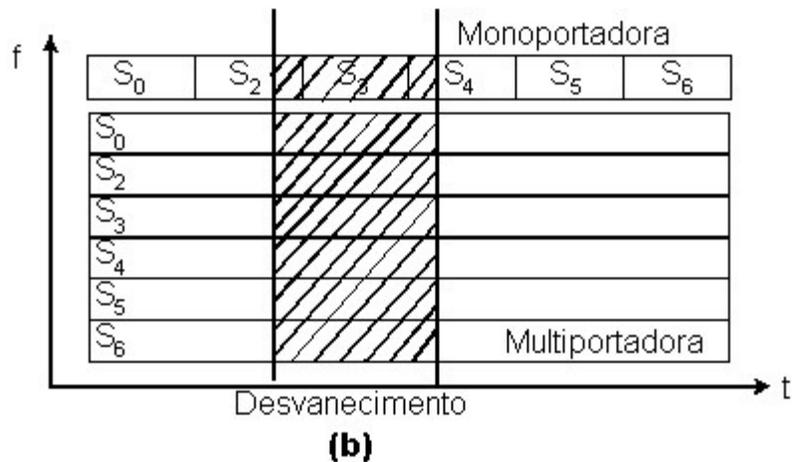


Figura 2.9 (a) Desvanecimento Seletivo (b) Desvanecimento plano

Como desvantagem da modulação COFDM cita-se a complexidade de geração e detecção dos símbolos COFDM se o número de portadoras for muito alto, aumentando-se as exigências de sincronismo entre as mesmas e a estabilidade de fase e frequência.

A amplificação de um sinal COFDM também é complicada porque o mesmo apresenta uma alta relação entre a potência de pico e a potência média PAPR (*Peak to Average Power Ratio*). Isto exige amplificadores de potência com uma extensa região linear de amplificação, que se traduz em um ponto de operação muito abaixo do ponto de saturação, nos casos de amplificadores classe A. Considerando os amplificadores de potência projetados em classe C, para alta eficiência, trabalha-se em um ponto de operação muito próximo do ponto de saturação, desta forma não devem ser usados em sistemas de modulação COFDM. Se forem usados é inevitável uma distorção por ceifamento de picos do sinal COFDM antes de sua transmissão, causando uma distorção não linear. Nos parágrafos seguintes é apresentado um resumo das vantagens e desvantagens da modulação OFDM.

O uso do sistema multiportadora reduz a taxa de bits no canal. A largura de faixa ocupada por cada subportadora é  $N$  vezes, menor do que a largura de faixa ocupada pelo sinal modulado por uma única portadora.

O sistema OFDM pode ser visto como  $N$  subsistemas independentes, devido à ortogonalidade das subportadoras. Deste modo, quando o número de subportadoras torna-se suficientemente elevado, o canal com desvanecimento seletivo em frequência de um sistema de portadora única transforma-se em um canal com desvanecimento plano para a subportadora afetada no sistema OFDM.

Em um sistema de portadora única, todos os símbolos transmitidos durante a ocorrência do desvanecimento são afetados, causando erros em rajada na recepção. No sistema multiportadora, apenas os símbolos transmitidos nas portadoras afetadas pelo desvanecimento são perdidos. Para evitar a ocorrência de erros em rajadas no sistema multiportadora, os símbolos transmitidos são entrelaçados antes de serem mapeados em  $N$  feixes de dados. Neste processo, as subportadoras adjacentes não transportam símbolos adjacentes, de modo que, se o desvanecimento afetar um grupo de subportadoras, não ocorrerão erros em rajada na recepção. Isto permite que o código corretor de erro atue efetivamente sobre os erros introduzidos.

A análise do sistema OFDM no domínio do tempo apresenta ainda outras vantagens com relação ao sistema de portadora única. Como o tempo de símbolo é tão longo quanto maior for o número de subportadoras utilizadas, o sinal OFDM torna-se mais robusto ao efeito do desvanecimento plano. Este fenômeno caracteriza-se por uma redução na potência do sinal recebido durante determinado intervalo de tempo. No caso do sistema de portadora única, como a taxa de transmissão é alta, o tempo de símbolo é pequeno, fazendo com que vários símbolos sejam perdidos durante a ocorrência do desvanecimento. No sistema multiportadora a ocorrência deste efeito afeta os  $N$  símbolos paralelos. Entretanto, se o número de subportadoras for suficientemente elevado, o tempo de símbolo torna-se maior do que a duração do desvanecimento, sendo que a interferência introduzida não acarreta na perda de símbolos transmitidos.

Como o tempo de símbolo OFDM torna-se  $N$  vezes maior do que o tempo de símbolo da transmissão serial, o sistema OFDM reduz significativamente a ISI introduzida pela sobreposição dos símbolos transmitidos, cuja causa é a dispersão temporal do canal. Em sistemas de portadora única com altas taxas de transmissão, a ISI compromete o desempenho da taxa de erro de bit se a duração da dispersão temporal do canal for da ordem de grandeza do tempo de símbolo. Os sistemas multiportadora são mais robustos aos efeitos da ISI pelo fato de apresentarem tempo de símbolo maior do que a dispersão temporal do canal. Esta robustez pode ser melhorada com a inserção de um tempo de guarda entre os símbolos adjacentes.

Embora as vantagens dos sistemas OFDM sejam evidentes, existem alguns problemas inerentes a esta técnica que limitam a sua utilização nos novos padrões de transmissão digital. O primeiro problema refere-se à complexidade de geração e detecção dos símbolos OFDM, que se eleva quando o número de subportadoras é alto, dificultando o sincronismo entre as mesmas. Desta forma, o número de subportadoras utilizadas deve ser uma solução de compromisso entre a estabilidade de fase e frequência e a capacidade de combater o desvanecimento seletivo em frequência.

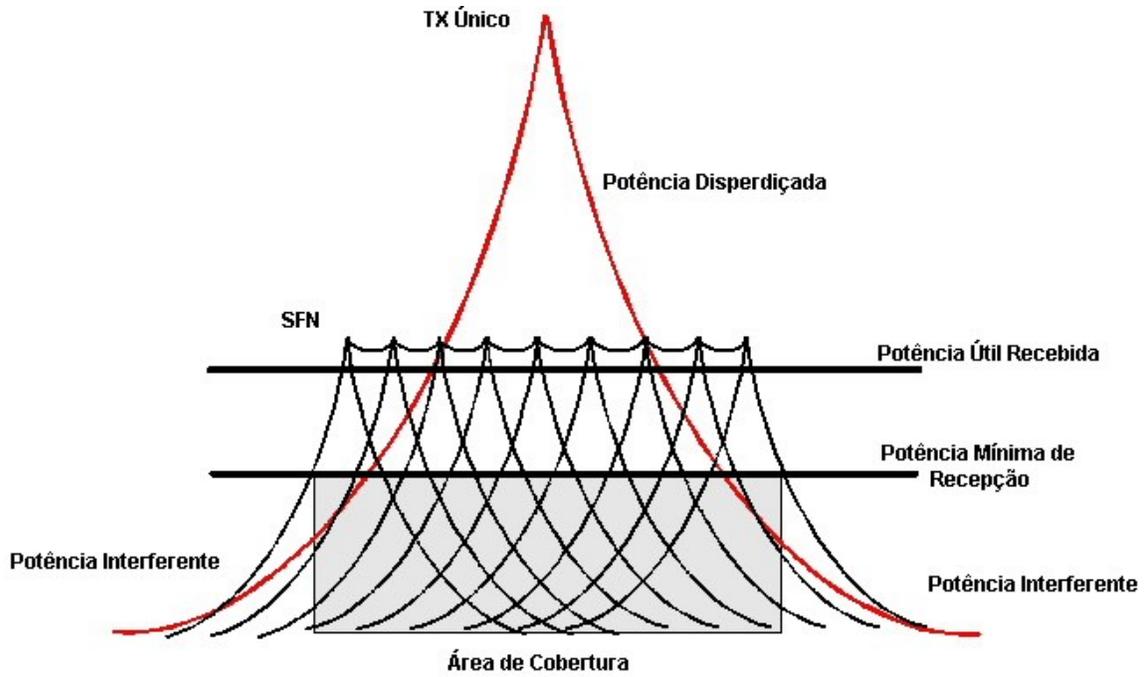
O segundo problema está relacionado à amplificação do sinal OFDM para tornar possível sua transmissão, pois o mesmo apresenta uma alta relação entre sua potência de pico e sua potência média,

uma vez que a primeira é muito maior do que a segunda. Isso exige que o amplificador de potência apresente uma região linear extensa, ou seja, o ponto de operação do amplificador deve estar muito abaixo do ponto de saturação, elevando o seu custo. Assim, é inevitável que os amplificadores tipo classe B e C ceifem os picos do sinal OFDM antes de transmiti-lo, introduzindo uma distorção não linear que pode degradar a qualidade do sistema se não for adequadamente tratada no projeto do amplificador.

## 2.5 Vantagens na Recepção Móvel

A principal vantagem que uma rede SFN pode oferecer a um possível serviço móvel é prover um ambiente de sinal mais uniforme para a recepção como pode ser visto na Figura ilustrativa 2.10.

Existe farta literatura documentando os modelos de canais rádio móveis como Rayleigh, Rice entre outros, como indicação resumida cita-se [14], [15], [16], [17]. Cada modelo toma em relevância um aspecto do canal a ser estudado como desvanecimento, multicaminhos em torno do receptor.



**Diferentes Potências Recebidas para Sistemas de único e SFN**

Figura 2.10 Comparação entre a Distribuição de Potência Recebida, Mono e Multi Portadora

De [18], pode-se facilmente verificar um ambiente mais propício a uma recepção móvel. Na Figura 2.11 é mostrada uma situação onde dois transmissores, operando com grande potência, cobrem a área R da figura. Neste caso eles operam em frequências distintas, porém com a mesma programação, e um sistema de chaveamento deve ser providenciado.

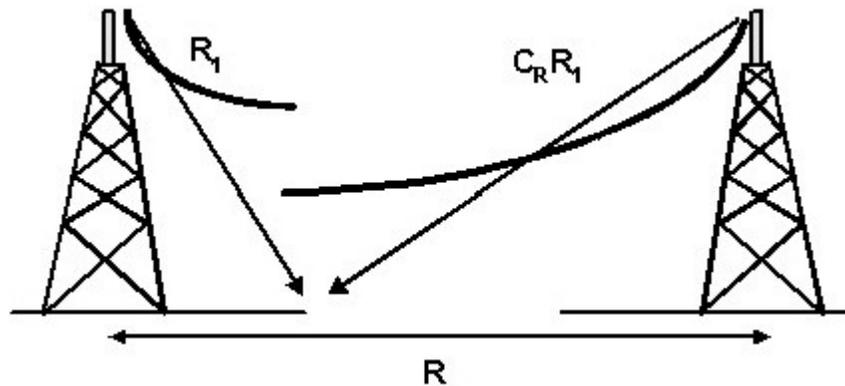


Figura 2.11 Interferência entre dois Transmissores

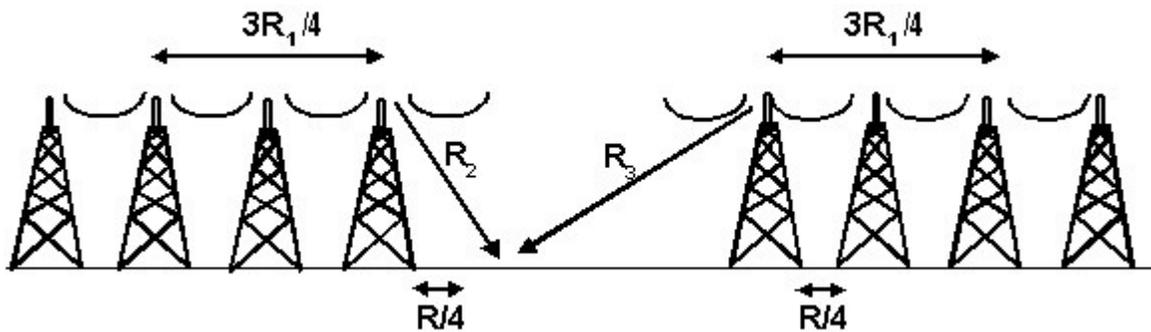


Figura 2.12 Diminuição da Interferência entre Duas Redes SFN

No sistema SFN, Figura 2.12, cada transmissor de grande potência é substituído por quatro transmissores de baixa potência que operam todos na mesma frequência com a mesma programação.

Assim tem-se duas redes SFN operando com uma significativa diminuição da interferência local entre ambas e internamente a cada rede o sinal está mais constante facilitando a recepção móvel.

Porém a recepção móvel de canal enfrenta não só dificuldades devido ao multipercurso natural do ambiente [15], [16], [17], mas também ao multipercurso devido ao efeito Doppler. Fisicamente entende-se por Efeito Doppler o efeito que ocorre quando o transmissor e / ou o receptor estão em movimento, ou então, quando chega ao receptor um sinal refletido em um objeto em movimento. A consequência é como se a frequência do sinal sofresse um desvio positivo ou negativo, conforme o objeto estivesse se aproximando ou se afastando do receptor.

Todos estes elementos causam variações na frequência do sinal originalmente transmitido. O resultado é a recepção de um sinal com conteúdo espectral disperso em torno da frequência original.

A existência do desvanecimento por Efeito Doppler está diretamente associada à variação do canal no tempo. Quanto maior a velocidade relativa do receptor em relação ao transmissor maior será o desvio de frequência. Uma aproximação bem simplista pode ser dada de acordo com a velocidade do móvel nas seguintes equações: [2.20], [2.21] e [2.22]

$$f_{Doppler} = \frac{v_{móvel}}{\lambda} \cos \theta \quad (2.20)$$

$$\lambda = \frac{c}{f_{Tx}} \quad (2.21)$$

$$f_{Doppler} = \frac{v_{móvel} \cdot f_{Tx}}{c} \cos \theta \quad (2.22)$$

onde  $\lambda$  é o comprimento de onda em relação à velocidade da luz 'c' de valor aproximado de 300.000 000 m/s. A variável ' $\theta$ ' representa o ângulo formado entre a direção do movimento e a frente de onda da direção de propagação da onda eletromagnética ' $f_{Tx}$ ' que atinge a antena receptora.

Como cada um dos sinais que chegam à antena sofre um desvio diferente, se formará o espectro 'Doppler', sendo que este fenômeno dá origem ao que se denomina 'Ruído FM Aleatório' em recepção móvel.

## 2.5 Comentários

Como foi visto anteriormente a modulação do sistema ATSC emprega um modelo monoportadora chamado 8-VSB. Este sistema emprega símbolos de curtíssima duração, cerca de 100  $\mu$ s, que ocupam todo o espectro disponível do canal de TV de 6 MHz. Por sua vez, a modulação COFDM, utilizada com algumas diferenças nos sistemas DVB-T e ISDB-T, empregam um modelo multiportadora utilizando símbolos de longa duração, até quase 1ms, que ocupam uma banda muito estreita, a partir de 1kHz, sendo que milhares de símbolos são transmitidos em paralelo, ocupando o canal de TV de 6 MHz. Para o ambiente de transmissão de TV terrestre parece mais bem adaptado o modelo multiportadora, onde uma diversidade em frequência permite uma melhor proteção frente às distorções impostas pelo canal de transmissão dos dados a serem transmitidos. Em comparação à TV analógica, a TV digital baseada em modulação OFDM necessita de menor potência para ser transmitida, mas se comparada ao sistema de transmissão 8-VSB ela necessita aproximadamente de 2 a 4 dB a mais para a mesma taxa de erros.

## **Capítulo 3**

### **Plano Básico de TV Digital**

#### **3.1 Canalização no Brasil**

A televisão aberta terrestre no Brasil é formada por estações geradoras e estações retransmissoras, sendo que as estações geradoras são responsáveis por criar conteúdo que é chamado de “programação” e as estações retransmissoras são responsáveis por repetir essa programação retransmitindo-a para recepção, pelo público em geral, em locais não atingidos diretamente pelos sinais da estação geradora de televisão ou atingidos em condições técnicas inadequadas.

No Brasil existem estações geradoras de TV que retransmitem o conteúdo de uma outra emissora e eventualmente inserem algum conteúdo diferente durante uma pequena parte do tempo. Estas estações são conhecidas como “afiliadas” das “grandes estações geradoras cabeça de rede”, ou simplesmente também chamadas de “cabeça de rede”. As estações geradoras afiliadas retransmitem a maior parte da programação da “cabeça de rede”, inserindo uma programação diferenciada durante um intervalo de tempo determinado. Por sua vez, as emissoras afiliadas geralmente cobrem grandes áreas com a mesma programação em canais diferentes.

Dentro do espectro eletromagnético a televisão brasileira ocupa a faixa de VHF e UHF conforme Tabela 3.1. No Brasil as respectivas faixas de VHF e UHF são divididas em canais de 6 MHz sendo que em outros países esta divisão pode ocorrer em 7 MHz ou 8 MHz. O espectro assim segmentado fornece os canais que serão utilizados pelas estações geradoras e estações retransmissoras.

O gerenciamento do espectro de frequências no Brasil é de responsabilidade da Anatel (Agência Nacional de Telecomunicações), subordinado ao Ministério das Comunicações. Cabe a Anatel o gerenciamento e fiscalização do espectro eletromagnético, e cabe ao Ministério das Comunicações a outorga das faixas de frequências para os executantes dos diversos serviços.

Com o nascimento nos Estados Unidos da televisão analógica em preto e branco, surgiu a necessidade de se alocar os primeiros canais para a radiodifusão dos sinais. Então, as primeiras regras para se evitar a interferência entre canais, ou seja, canais de mesma faixa de frequências, chamados de co-canais, começaram a surgir. Inicialmente, os canais só poderiam ser reutilizados a partir de uma determinada distância, o mesmo acontecendo com os canais vizinhos em faixa, ou seja, canais adjacentes inferiores e superiores.

Porém, as interferências não eram somente limitadas a estes casos, haviam outras interferências devido a inúmeros problemas que implicavam em diferentes regras para a reutilização dos canais. Este sistema também foi adotado no Brasil, onde, em cada nova localidade, procurou-se evitar a utilização de determinados canais, a fim de se evitar interferências entre os mesmos.

Na mesma época também começaram a surgir os primeiros enlaces, conhecidos entre os radiodifusores como *links* de microondas, destinados a transportar o sinal da geradora até o posto retransmissor, que por sua vez retransmitiria para a região o sinal da estação geradora da programação. Posteriormente, com o advento do satélite, facilitou-se a forma de envio dos sinais para retransmissão, principalmente para lugares muito distantes dos grandes centros urbanos, onde um enlace terrestre de microondas seria muito dispendioso, porém com o passar do tempo a utilização do satélite também foi ficando cada vez mais cara. Hoje a solução para a retransmissão está num meio termo entre terrestre e satélite, devido ao barateamento dos pares de transmissor-receptor para enlaces de microondas.

O serviço de recepção direta do satélite em banda C pelo usuário comum não é um serviço regulamentado pela Anatel. Assim, não existe nenhuma obrigação por parte das estações geradoras em manter o sinal, uma vez que este é um serviço auxiliar para as grandes redes de TV enviarem seus sinais para as afiliadas em todo Brasil. O vídeo pode, por exemplo, ficar somente com sinal de teste sem programação, pode ser inclusive desligado, por tratar-se de um serviço que em princípio seria usado somente pelas redes de TV. Hoje o sinal para uso das redes ocupa outras faixas, é digital e está codificado. Porém, como as grandes redes de TV sabem que ainda existem muitos usuários sintonizando este sinal (aproximadamente 10 milhões no Brasil), estas não desligam completamente o sistema, mesmo representando um custo adicional para elas. Para o usuário este sinal não é cobrado, podendo ser considerado aberto e gratuito como a TV aberta terrestre.

No caso específico da cidade de Campinas e região, inicialmente nas décadas de 50 e 60, os sinais eram recebidos dos transmissores das estações geradoras de São Paulo, que a princípio ficavam no morro do Jaraguá, transmitindo os canais de São Paulo como TV Tupi canal 4, TV Record canal 7, TV Cultura canal 2, TV Excelsior canal 9, e TV Globo canal 5.

Com o passar do tempo cidades como Campinas e outras foram ganhando canais de estações geradoras e retransmissoras e no caso, Campinas deixou de receber os sinais do morro do Jaraguá, para ter localmente na cidade suas estações geradoras ou retransmissoras em outros canais. Estes canais foram alocados de forma que não interferissem com os canais de São Paulo, obedecendo às regras de interferência co-canal, canal adjacente inferior e superior, batimentos de FI, frequência-imagem de áudio, frequência imagem de vídeo, e oscilador local.

Logo na viabilização de canais, a cada nova localidade, tanto para geração como para retransmissão, são utilizados canais diferentes, sendo hoje conhecido este sistema como MFN (*Multi Frequency Network*). A partir disso, começaram a ocorrer casos em que a mesma programação está em canais diferentes para a mesma localidade, por exemplo, o sinal da geradora e o sinal da retransmissora cobrindo parte de uma mesma localidade.

O Plano de Canalização Digital no Brasil é um apenso ao Regulamento Técnico para Prestação do Serviço de Radiodifusão de Sons e Imagens e do Serviço de Retransmissão de Televisão. Estes critérios são aplicáveis até a elaboração do novo Regulamento Técnico a ser expedido após a definição do sistema de transmissão terrestre de TV digital que será utilizado no Brasil, visando regras para a elaboração de projetos de viabilidade de inclusão e alteração de canais nos respectivos planos de canalização.

A canalização no Brasil está dividida em Planos Básicos, sendo eles:

- PBTV, Plano Básico de Distribuição de Canais de TV, Geração em VHF e UHF.
- PBTVA, Plano Básico de Atribuição de Canais de TV por assinatura em UHF
- PBRTV, Plano Básico de Distribuição de Canais para Retransmissão de TV em VHF e UHF.
- PBTVD, Plano Básico de Distribuição de Canais Digitais em VHF e UHF.

De [19] que alteram os Regulamentos Técnicos para emissoras de Radiodifusão altera a faixa de canais para TV digital, dando a seguinte redação:

*"Este Anexo VII tem por objetivo estabelecer os critérios técnicos para a elaboração de projetos de viabilidade de inclusão e alteração de canais analógicos no Plano Básico de Distribuição de Canais de Televisão em VHF e UHF (PBTV) e no Plano Básico de Distribuição de Canais de Retransmissão de Televisão em VHF e UHF (PBRTV), assim como a inclusão de canais digitais no Plano Básico de Distribuição de Canais de TV Digital (PBTVD), exclusivamente para viabilização do par digital dos*

canais do PBTv que já tenham sido objeto de outorga de concessão ou dos canais do PBRTv que já tenham sido objeto de emissão de autorização à ocasião da sua apresentação à Anatel".

Então podem ser viabilizados canais da faixa alta de VHF e da faixa de UHF. A Tabela 3.1 mostra a canalização na faixa de VHF e a Tabela 3.2 mostra a canalização na faixa de UHF.

Tabela 3.1 Canalização para TV Digital na Faixa de VHF

CANAL	FREQÜÊNCIAS Extremas (MHz)
7	174-180
8	180-186
9	186-192
10	192-198
11	198-204
12	204-210
13	210-216

Tabela 3.2 Canalização para TV Digital na Faixa de UHF

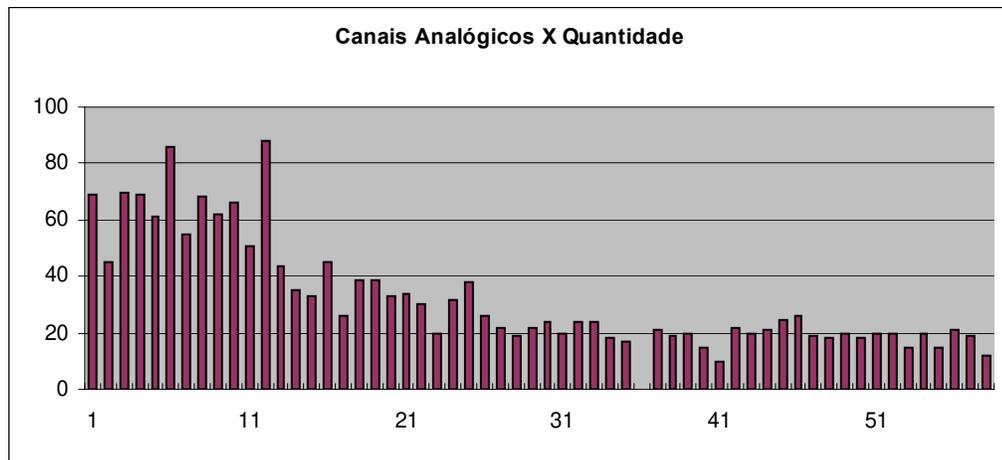
CANAL	FREQÜÊNCIAS Extremas (MHz)
14	470-476
15	476-482
16	482-488
17	488-494
18	494-500
19	500-506
20	506-512
21	512-518
22	518-524
23	524-530
24	530-536
25	536-542
26	542-548
27	548-554

28	554-560
29	560-566
30	566-572
31	572-578
32	578-584
33	584-590
34	590-596
35	596-602
36	602-608
38	614-620
39	620-626
40	626-632
41	632-638
42	638-644
43	644-650
44	650-656
45	656-662
46	662-668
47	668-674
48	674-680
49	680-686
50	686-692
51	692-698
52	698-704
53	704-710
54	710-716
55	716-722
56	722-728
57	728-734
58	734-740
59	740-746

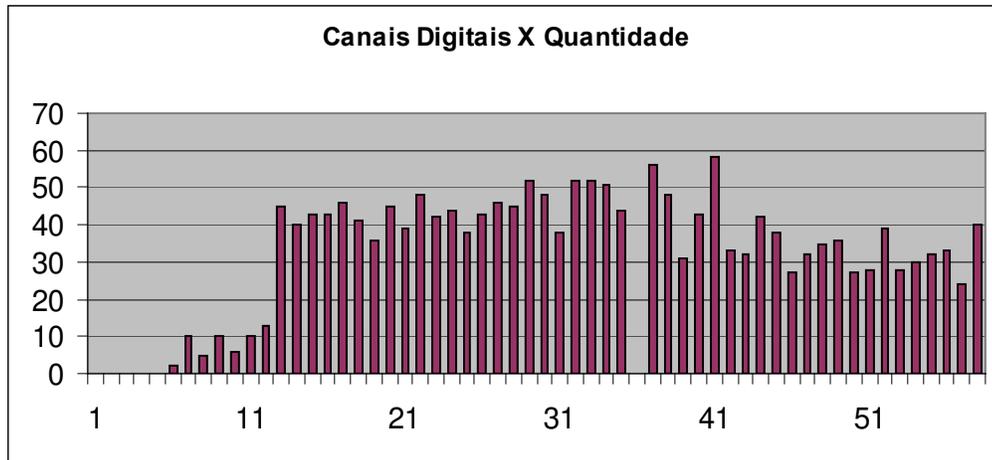
A diferença entre a canalização da TV digital e a TV analógica atual é que foram suprimidos os canais de VHF baixo, 2, 3, 4, 5, e 6. Conforme orientação do *Relatório Técnico: Planejamento de Canais de TV Digital* [20], não se conhecendo qual padrão de transmissão adotado, não se poderia, na época, antever a robustez do sistema com relação ao ruído impulsivo. Observa-se que o canal 37 UHF não é utilizado para o serviço de radiodifusão de TV.

Quando ocorrer a implantação da TV digital, haverá um período em que ambos os sistemas, analógico e digital estarão em funcionamento e então se espera uma situação de interferência mais crítica que a existente hoje.

Partindo-se de um conjunto de cerca de 5657 canais analógicos, serão implantados mais 1893 canais digitais aproximadamente, de acordo com o gráfico de distribuição mostrado nas Figuras 3.1a e 3.1b [21].



(a)



(b)

Figura 3.1 Representação de Canais x quantidade (a) analógicos (b) digitais

Destacando-se a importância da rede de retransmissão, pode-se citar que no Brasil tem-se, para a televisão analógica, aproximadamente, 434 canais considerados como estações geradoras, e cerca de 5223 canais estações retransmissoras de TV [20].

Assim, os canais utilizados para retransmissão superam em cerca de doze vezes os canais utilizados para geração de programação, como pode ser visto no gráfico da Figura 3.2.

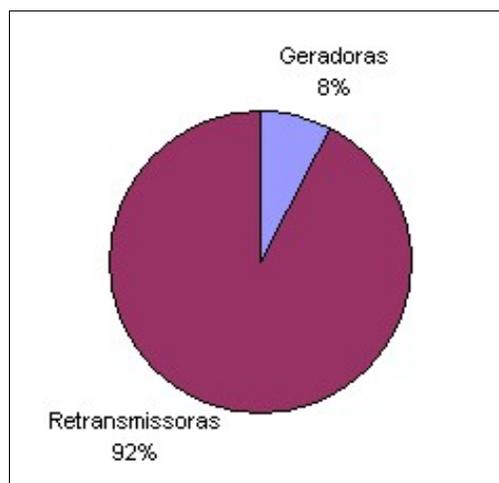


Figura 3.2 Relação entre Retransmissoras e Geradoras no Brasil (Fonte Anatel)

Entre setembro de 1999 e maio de 2000 foram realizados testes de laboratório e de campo de três sistemas de TV digital: ISDB-T, japonês, DVB-T, europeu, e ATSC, americano. Os resultados obtidos nos referidos testes permitiram a adoção de critérios técnicos, visando o desenvolvimento de um planejamento que assegurasse um canal de TV digital para cada estação geradora ou retransmissora de televisão, segundo critérios pré-definidos [20].

Estes princípios nortearam os trabalhos de planejamento de canais, coordenados pela Anatel, em conjunto com o CPqD, e publicados no Plano Básico de Distribuição de Canais Digitais PBTVD aprovado em maio de 2005. Em maio de 2003, a situação da canalização no Brasil se apresentava conforme a Tabela 3.3 incluindo-se os canais de TV por assinatura, via ar, TVA.

Tabela 3.3 Distribuição de Canais no Brasil

Canais	TV	RTV	TVA	Total
Outorgado/Autorizados	434	5223	25	5682
Vagos	3196	2647	2	5845
Total	3630	7870	27	11527

## 3.2 Resultados Importantes do Relatório Técnico

A seguir serão descritos os resultados mais importantes do *Relatório Técnico: Planejamento de Canais de TV Digital* [20], no que se refere aos níveis de recepção fixa de sinal, considerando inclusive recepção com antena interna.

### 3.2.1 Recepção com Antena Externa

Para este estudo, foi considerada uma instalação típica em um ponto localizado na borda da área de serviço, com uma antena externa a uma altura de 10 metros do chão. Na Tabela 3.4 é mostrada a

intensidade de campo mínima para recepção, juntamente com fatores como ruído impulsivo, e ganho da antena de recepção.

Tabela 3.4 Intensidade Mínima para Recepção com Antena Externa

Fator	Símbolo	VHF Baixo	VHF Alto	UHF	Fórmula
Largura de faixa (MHz)	B	6			
Constante de Boltzmann (Ws/K)	k	1,38 X10 <sup>-23</sup>			
Temperatura Absoluta (K)	T	290			
Ruído Térmico (dBm)	N <sub>t</sub>	-106,20			N <sub>t</sub> = kTB
Figura de Ruído do Receptor (dB)	N <sub>r</sub>	10			Testes de Laboratório realizados no Brasil [22]
Limiar de C/N (dB)	C/n	15+D			D = 0 para ATSC D = 2 para COFDM FEC 2/3 D = 4 para COFDM FEC 3/4
Mínima Potência do Sinal (dBm)	P <sub>s</sub>	-81,2+D			P <sub>s</sub> (dBm) = N <sub>t</sub> (dBm) + N <sub>r</sub> (dB) + C/N(dB)
Frequencia Central (MHz)	f <sub>b</sub>	69	194	592	Média Geométrica dos Extremos da Faixa
Comprimento de Onda (m)	λ	4,35	1,55	0,51	λ + 300 / f <sub>b</sub>
Área Efetiva da Antena Isotrópica (dBm <sup>2</sup> )	A <sub>i</sub>	1,77	-7,21	-16,90	A <sub>i</sub> = λ <sup>2</sup> / (4 π)
Ganho do Dipolo de Meia Onda em relação à Antena Isotrópica (dBi)	G <sub>i</sub>	2,15			
Ganho da Antena em relação ao Dipolo de meia Onda (dBd)	G	4,5	6,5	10	Antena Comercial
Impedância Intrínseca (Ω)	η	120π			

Fator de Dipolo (dBm-DbuV/m)	$K_d$	-111,84	-120,82	-130,51	$K_d = (A_i G_i) / \eta$
Perda em cabos (dB)	$L_f$	1	2	4	
Margem frente à Ruído Impulsivo	$M_m$	6	1	0	
Intensidade de Campo Mínima (dBuV/m)	$E_{min}$	33,14 + D	36,12 + D	43,31 + D	$E_{min}(\text{dBuV/m}) = P_s(\text{dBm}) + L_f(\text{dB}) + M_m(\text{dB}) - G(\text{dBd}) - K_d(\text{dBm- dBuV/m})$

### 3.2.2 Recepção com Antena Interna

Para a recepção interna, considerou-se a antena instalada a 1,5 metros de altura do piso, estando este no segundo piso de um prédio. O relatório considerou este como o pior caso, em se tratando da altura da antena de recepção em relação ao solo. Na Tabela 3.5, é mostrada a intensidade de campo mínima para recepção, juntamente com fatores como ruído impulsivo, ganho da antena de recepção, margem por perda de penetração em edificações e margem por redução da altura da antena de recepção.

Tabela 3.5 Intensidade Mínima para Recepção com Antena Interna

Fator	Símbolo	VHF Baixo	VHF Alto	UHF	Fórmula
Largura de faixa (MHz)	B	6			
Constante de Boltzmann (Ws/K)	k	1,38 X10 <sup>-23</sup>			
Temperatura Absoluta (K)	T	290			
Ruído Térmico (dBm)	$N_t$	-106,20			$N_t = kTB$
Figura de Ruído do Receptor (dB)	$N_r$	10			Testes de Laboratório realizados no Brasil [22]
Limiar de C/N (dB)	C/n	15+D			D = 0 para ATSC D = 2 para COFDM FEC 2/3 D = 4 para COFDM FEC 3/4
Mínima Potência do Sinal (dBm)	$P_s$	-81,2+D			$P_s(\text{dBm}) = N_t(\text{dBm}) + N_r(\text{dB}) + C/N(\text{dB})$

Frequência Central (MHz)	$f_b$	69	194	592	Média Geométrica dos Extremos da Faixa
Comprimento de Onda (m)	$\lambda$	4,35	1,55	0,51	$\lambda + 300 / f_b$
Área Efetiva da Antena Isotrópica (dBm <sup>2</sup> )	$A_i$	1,77	-7,21	-16,90	$A_i = \lambda^2 / (4 \pi)$
Ganho do Dipolo de Meia Onda em relação à Antena Isotrópica (dBi)	$G_i$	2,15			
Ganho da Antena em relação ao Dipolo de meia Onda (dBd)	$G$	-2,2	-2,2	0	Antena Comercial
Impedância Intrínseca ( $\Omega$ )	$\eta$	120 $\pi$			
Fator de Dipolo (dBm-DbuV/m)	$K_d$	-111,84	-120,82	-130,51	$K_d = (A_i G_i) / \eta$
Perda em cabos (dB)	$L_f$	0	0	0	
Altura da Antena em relação ao Piso (m)	$H_a$	1,5			
Margem por Redução da Altura da Antena de Recepção (dB)(segundo piso)	$M_h$	5	5	6	
Margem por Perda de Penetração (dB)	$M_p$	8	8	7	
Margem frente à Ruído Impulsivo	$M_m$	6	1	0	
Intensidade de Campo Mínima (dBuV/m)	$E_{min}$	51,84 + D	55,82 + D	62,31 + D	$E_{min}(\text{dBuV/m}) = P_s(\text{dBm}) + L_f(\text{dB}) + M_m(\text{dB}) - G(\text{dBd}) - K_d(\text{dBm- dBuV/m})$

### 3.2.3 Relações de Proteção

Ainda baseado nos testes de laboratório de [22], o relatório apresenta as relações de proteção adotadas. Estas relações são descritas na Tabela 3.6, representando as condições de pior caso envolvendo as configurações 8-VSB (ATSC), COFDM 64 QAM FEC 2/3 e COFDM 64 QAM FEC 3/4. No caso de interferência de um canal digital sobre um canal analógico, o critério de Grau 3 de Qualidade (ITU-R Recommendation BT 500-11, "Methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures") foi utilizado conforme [20]. Os valores apresentados na Tabela 3.6 referem-se aos valores desejados de relação de proteção.

Tabela 3.6 Relações de Proteção do Relatório Técnico

Canal Interferente	Canal Desejado = N Relação (dB)			
	Analogico sobre Analogico	Digital sobre Analogico	Analogico sobre Digital	Digital sobre Digital
N-1 (Adjacente inferior)	-6	-11	-26	-24
N (Co-Canal)	+28 (com decalagem) +45 (sem decalagem)	+34	+7	+19
N+1 (Adjacente superior)	-12	-11	-26	-24
N-8 e N+8 (FI)	-12	-25	Não Aplicável	Não Aplicável
N-7 e N+7 (Oscilador Local)	-6	-24	Não Aplicável	Não Aplicável
N+14 (Imagem de Áudio)	-6	-24	Não Aplicável	Não Aplicável
N+15 (Imagem de Vídeo)	+3	-22	Não Aplicável	Não Aplicável

As Tabelas 3.12 e 3.14 transcrevem os resultados deste relatório, porém sem as explicações das condições utilizadas descritas acima. Para fins de co-localização foram transcritos os resultados nas Tabelas 3.15 e 3.16, sendo que a observação a ser feita é que foram definidas as relações entre potências dos canais de TV analógica e digital que devem satisfazer os critérios de Limite de Perceptibilidade (LOP) [20] determinados nos testes de laboratório realizados no Brasil. Quanto ao padrão de antena

externa de recepção, adotou-se que a antena de recepção apresenta um padrão de ganho diretivo, relacionado com o quadrado do co-seno do ângulo de discriminação.

Nos cálculos de interferência, a atenuação do sinal interferente é dada por  $10 \cdot \log_{10}[\cos^2(\theta)]$  dB, onde  $\theta$  é o ângulo formado pela linha entre o ponto de recepção e a estação a ser protegida e a linha entre o ponto de recepção e a estação interferente, nunca excedendo o valor de 6 dB para VHF e 14 dB para UHF.

### 3.2.4 Critérios adotados no Planejamento

Atendimento de pelo menos 90% do tempo, e 70% dos locais com recepção utilizando antena externa, no Contorno Protegido das estações, resultando nos requisitos dados na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 Critérios para Cobertura com Antena Externa de Recepção no Contorno Protegido.

Fator	VHF Baixo	VHF Alto	UHF
Intensidade de Campo Mínima (dBuV/m)	33 + D	36+ D	44+ D
Correção para 70% dos locais (dB)	2,5	2,5	3
Intensidade de Campo E(50,90) no Contorno protegido(dBuV/m)	36 + D	39+ D	47 + D

Atendimento de 90% do tempo, de 50 % dos locais com recepção utilizando antena interna, no Contorno 1 (área de serviço urbana) das estações resultando nos critérios da Tabela 3.8

Tabela 3.8 Critérios para Cobertura com Antena Interna de Recepção no Contorno 1 (Urbana)

Fator	VHF Baixo	VHF Alto	UHF
Intensidade de Campo Mínima (dBuV/m)	52 + D	56 + D	63+ D
Intensidade de Campo E(50,90) no Contorno 1(dBuV/m)	52 + D	56 + D	63 + D

Resumindo os critérios adotados neste planejamento foram:

- Utilização de curvas de propagação E (50,90) para os cálculos de Contornos de Proteção;
- Atendimento dos critérios de cobertura com antena externa, no Contorno Protegido, para todos os sistemas de TV Digital considerados (D = 0, D = 2, e D = 4, de acordo com as Tabelas 3.4 e 3.7);

- Atendimento dos critérios de cobertura com antena interna, no Contorno 1, área urbana, para todos os sistemas de TV Digital considerados (D = 0, D = 2, e D = 4, de acordo com as Tabelas 3.5 e 3.8). Uma relação constante de potência entre os canais de TV analógica e de TV digital com o mesmo Contorno Protegido;

- Possibilidade de conversão de canais de TV analógica em canais de TV digital, satisfazendo suas relações de proteção específicas.

### **3.3 Planejamento Oficial de Canais de TV Digital no Brasil**

A implantação da TV digital aberta acontecerá com a TV analógica existente ainda em funcionamento, caracterizando-se uma fase de simultaneidade em que ambos os sistemas estarão no ar, devido a não compatibilidade entre os sistemas de TV analógico e digital. Nesta fase haverá convivência de canais analógicos e digitais e posteriormente a TV analógica será desativada e somente os canais digitais existirão.

O plano foi concebido para replicar a cobertura das emissoras de TV analógicas sempre que tecnicamente possível e ser independente do sistema que vier ser aprovado no Brasil para a TV digital. Foram viabilizados conjuntos de canais que prevêm ou não o reuso de frequências, conforme o sistema de transmissão adotado. Foram contempladas pelo plano as localidades atendidas por, pelo menos, uma geradora de TV ativa, sendo considerada ativa a partir da abertura de edital, e as retransmissoras sendo consideradas ativas a partir da autorização para prestação do serviço, mesmo utilizando um canal do PBTv.

Também foram consideradas as localidades com população superior a 100.000 habitantes ou situadas em regiões com alto congestionamento do espectro, atualmente atendidas por pelo menos uma retransmissora ativa.

#### **3.3.1 Premissas Adotadas para o Planejamento**

Foi priorizada a faixa de UHF para a distribuição de canais digitais, sendo que na impossibilidade de seu uso devem ser utilizadas as faixas de VHF alto e VHF baixo, nesta ordem, isso por causa da

suscetibilidade de algumas configurações dos sistemas de transmissão digital de TV ao ruído impulsivo, sendo mais relevante nas frequências mais baixas.

O plano considerou a utilização dos canais da faixa de 60 a 69 de UHF, caso o padrão de TV digital adotado no país não tenha capacidade plena para o reuso de frequência (SFN), porém esta condição está restrita para o atendimento de grupos de localidades vizinhas em que não foram possíveis canais viáveis nas faixas preferenciais.

No caso de regiões de sombra, em que duas ou mais emissoras de uma localidade utilizem a mesma programação básica, foi viabilizado um único canal digital, sendo esta situação conhecida como *Gap-Filler* (retransmissoras reforçadoras de sinal). Em decorrência de estudos realizados em 1999/2000 [20], chegou-se à conclusão que os três sistemas de TV digital permitem o uso de *Gap-Fillers*.

### 3.3.2 Classificação das Estações Digitais

As emissoras digitais foram classificadas em Classe Especial, Classe A, Classe B e Classe C. Esta classificação foi mantida no mesmo padrão da classificação anterior do sistema analógico. A Tabela 3.9 indica os valores máximos de ERP para cada classe de estação, a altura de referência adotada (HNMT) e as respectivas distâncias máximas ao contorno protegido para a faixa de VHF. A Tabela 3.10 indica os valores máximos de ERP para cada classe de estação, a altura de referência adotada (HNMT) e as respectivas distâncias máximas ao contorno protegido para a faixa de UHF.

Tabela 3.9 Classificação das Estações em Função de suas Características Máximas para a Faixa de VHF

Classe	Canal	Máxima Potência ERP	Altura de Referência Acima do Nível Médio da Radial (m)	Distância Máxima ao Contorno Protegido (km)
Especial	VHF	16 kW (12dBk)	150	72
A	VHF	1,6 kW (2dBk)		56
B	VHF	0,16 kW (-8dBk)		39
C	VHF	0,016 kW (-18dBk)		25

Tabela 3.10 Classificação das Estações em Função de suas Características Máximas para a Faixa de UHF

Classe	Canal	Máxima Potência ERP	Altura de Referência Acima do Nível Médio da Radial (m)	Distância Máxima ao Contorno Protegido (km)
Especial	14 a 25	70 kW (18,5dBk)	150	57
	26 a 46	80 kW (19dBk)		
	47 a 59	100kW (20dBk)		
A	14 a 59	8 kW (9dBk)		42
B	14 a 59	0,8 kW (-1dBk)		29
C	14 a 59	0,08 kW (-11dBk)	18	

### 3.3.3 Contorno Protegido

Todo canal digital [23] é protegido contra interferências prejudiciais dentro da área delimitada pelo seu contorno protegido, que corresponde ao lugar geométrico dos pontos onde a intensidade de campo de seu sinal tem os valores indicados na Tabela 3.11.

Para fins de planejamento, os pontos do contorno protegido dos canais digitais são obtidos através de tabelas de intensidade de campo que representam as curvas estatísticas E(50,90), as quais fornecem os valores de intensidade de campo excedidos em 50% dos locais e 90% do tempo. Maiores detalhes sobre podem ser obtidos na referência [19]. Para a determinação do contorno protegido, devem ser tomadas as características estabelecidas em plano básico ou aquelas propostas para o canal a ser incluído.

Tabela 3.11 Intensidade de Campo do Contorno Protegido

Faixa de Freqüência	VHF	UHF
E (50,90) em dB $\mu$ V/m	43	51

### 3.3.4 Relações de Proteção

A proteção dos canais analógicos e digitais é considerada assegurada para um serviço livre de interferências quando, em seu contorno protegido, a relação do sinal desejado e cada um dos sinais interferentes tiver, no mínimo, o valor indicado na Tabela 3.12 para canais em VHF e UHF, em função do canal interferente.

A Tabela 3.14 indica as relações de proteção específicas para canais em UHF.

Tabela 3.12 Relações de Proteção (dB) para Canais em VHF e UHF.

Canal Interferente	Canal Desejado = N		
	Digital sobre Analógico	Analógico sobre Digital	Digital sobre Digital
N (Co-Canal)	+34	+7	+19
N-1 (adjacente inferior)	-11	-26	-24
N+1 (adjacente superior)	-11	-26	-24

A título de comparação é mostrada na Tabela 3.13, a relação de proteção para um receptor digital no sistema ISDB-T conforme norma B-31 ARIB Standard [24], onde os parâmetros de recepção são: Intervalo de Guarda 1/8, Modulação 64 QAM, Modo 8k e Taxa de Código 7/8.

Tabela 3.13 Relações de Proteção (dB) para Sistema ISDB-T

Canal Interferente	Canal Desejado = N	
	Digital sobre Digital	
N (Co-Canal)	+24	
N-1 (adjacente inferior)	-26	
N+1 (adjacente superior)	-29	

Tabela 3.14 Relações de Proteção (dB) Específicas para Canais em UHF.

Canal Interferente	Canal Desejado = N		
	Digital sobre Analógico	Analógico sobre Digital	Digital sobre Digital
N-8 e N+8 (FI)	-25	Não Aplicável	Não Aplicável
N-7 e N+7 (Oscilador Local)	-24	Não Aplicável	Não Aplicável
N+14 (Imagem de Áudio)	-24	Não Aplicável	Não Aplicável
N+15 (Imagem de Vídeo)	-22	Não Aplicável	Não Aplicável

No caso de antenas co-localizadas, as estações são consideradas protegidas se forem observadas as relações mínimas, entre a potência ERP do canal desejado e a potência ERP do canal interferente, estabelecidas na Tabela 3.15 para os canais em VHF e UHF envolvidos. As relações mínimas de potência ERP, específica para canais em UHF com antenas co-localizadas, estão indicadas na Tabela 3.16.

Duas ou mais antenas são consideradas co-localizadas, quando instaladas em uma mesma estrutura de sustentação ou em estruturas afastadas de até 2 km, e sendo mantido o afastamento de até 400 m quando a co-localização envolver apenas canais analógicos.

Tabela 3.15 Relações Mínimas entre Potências ERP (dB) para canais Co-localizados em VHF e UHF

Canal Interferente	Canal Desejado = N		
	Digital sobre Analógico	Analógico sobre Digital	Digital sobre Digital
N-1 (adjacente inferior)	0	-26	-24
N+1 (adjacente superior)	0	-26	-24

Tabela 3.16 Relações Mínimas entre Potências ERP (dB) para canais Co-localizados em UHF.

Canal Interferente	Canal Desejado = N		
	Digital sobre Analógico	Analógico sobre Digital	Digital sobre Digital
N-8 e N+8 (FI)	-10	Não Aplicável	Não Aplicável
N-7 e N+7 (Oscilador Local)	-10	Não Aplicável	Não Aplicável
N+14 (Imagem de Áudio)	-10	Não Aplicável	Não Aplicável
N+15 (Imagem de Vídeo)	-8	Não Aplicável	Não Aplicável

### 3.3.5 Determinação do Sinal Interferente

O valor de intensidade de campo do sinal interferente é determinado pela aplicação da relação de proteção, correspondente a cada situação sobre o valor de intensidade de campo do contorno protegido. As relações de proteção entre canais analógicos e digitais e entre canais digitais estão estabelecidas nas Tabelas 3.12 e 3.14.

Os valores de intensidade de campo interferentes estão indicados nas Tabelas 3.17 e 3.18, aplicáveis respectivamente, às faixas de VHF e UHF.

Tabela 3.17 Valores de Intensidade de Campo Interferente para VHF

E (50,10) em dB $\mu$ V/m					
Digital sobre Analógico		Analógico sobre Digital		Digital sobre Digital	
Co-Canal	Canal Adj.	Co-Canal	Canal Adj.	Co-Canal	Canal Adj.
30	75	36	69	24	67

Tabela 3.18 Valores de Intensidade de Campo Interferente para UHF

E (50,10) em dB $\mu$ V/m									
Digital sobre Analógico						Analógico sobre Digital		Digital sobre Digital	
Co-Canal	Canal Adjac.	Osc. Local	Freq. Imag. Áudio	Freq. Imag. Vídeo	Bat de FI	Co-Canal	Canal Adjac.	Co-Canal	Canal Adjac.
36	81	94	94	92	95	44	77	32	75

### 3.4 Reuso de Frequências

Em princípio não se deve utilizar dois canais mutuamente interferentes no mesmo local, porém se isto fosse levado ao pé da letra não haveria canais para todos os serviços em todas as localidades. O sistema MFN funcionou assim desde o surgimento da TV terrestre nos Estados Unidos, com o FCC estipulando distâncias mínimas entre geradoras de TV que na época eram poucas.

Com o passar do tempo foi aumentando o número de executantes do serviço e as cidades, por sua vez, queriam receber todos os canais existentes. Então surgiram os primeiros estudos de interferência que começaram a estipular regras para a convivência de canais interferentes na mesma localidade. A questão é tão complexa que quase todos os países do mundo possuem órgãos que regulamentam e fiscalizam o uso do espectro eletromagnético. Para a TV analógica são consideradas nove restrições de interferência sendo

elas: co-canal, canal adjacente inferior e superior, batimento de FI superior e inferior, frequência imagem de áudio, frequência imagem de vídeo, e oscilador local superior e inferior. Por outro lado, para o sistema digital há somente três restrições: co-canal, canal adjacente inferior e superior, sendo que estudos mostram que é possível a convivência de canais interferentes, desde que sejam observados certos limites de potência e intensidade de campo como foi mostrado no PBTVD. É claro que este é um assunto muito controvertido e é preferível sempre se utilizar um conjunto de canais que não sejam mutuamente interferentes. Logo o reuso de frequências, na prática para a televisão terrestre, é um assunto que causa muita polêmica que deve aumentar com a entrada da TV digital junto com a TV analógica, e posteriormente diminuir muito com o desligamento do sistema analógico. Espera-se que neste ponto a tecnologia esteja bem desenvolvida, a ponto de as interferências digitais co-canal e canal adjacente superior e inferior serem completamente ignoradas pelo receptor. Percebe-se assim que a utilização de redes SFN ajudaria neste quesito, uma vez que jogaria para um futuro mais distante a saturação do sistema.

### **3.4.1 Alterações no PBTVD para Viabilização das Redes SFN**

Basicamente pouca coisa necessitaria ser alterada no plano já elaborado, visto que o canal SFN em cada localidade deve ser tratado como um canal comum frente aos outros canais existentes. Seria preciso que o sistema de reserva de futuros canais fosse alterado. Por exemplo, se o canal é de uma SFN, na região de cobertura da executante do serviço, não deve ser outorgado o mesmo canal para outra executante do serviço. Para ilustrar a questão, supõe-se que é outorgado a uma executante do serviço o canal 35 para a região do estado de São Paulo, então este mesmo canal não seria outorgado a outra executante do serviço dentro do estado de São Paulo. Lembrando que estes canais só seriam outorgados para as executantes do serviço que possuem redes de retransmissão terrestre.

A canalização assim proposta seria uma complementação ao PBTVD com grandes vantagens que a tecnologia dispõe para uso.

### 3.5 Comentários

O plano aprovado foi elaborado pensando-se em viabilização de canais para um sistema de distribuição em MFN. São necessários milhares de canais para se executar o serviço de retransmissão de TV como mostrado no gráfico da Figura 3.2, sendo que a retransmissão de sinais representa a maior parte da utilização de canais para a viabilização do serviço. Se o sistema a ser utilizado para a retransmissão da TV digital, adicionalmente, também contemplar o sistema SFN para a retransmissão de TV, considerando o caso de mesma programação básica, então se obtém uma grande redução dos quase 2000 canais a serem viabilizados que viriam a se somar aos já existentes.

No presente momento, agosto de 2006, já se iniciam as discussões do argumento de que se todas as retransmissoras devem, também, receber seu par digital, mas se tal fato não acontecer significa que a maior parte da população ficará sem TV, visto que hoje o sistema está fortemente baseado em retransmissão. Uma das grandes falhas do sistema MFN é que são outorgadas inúmeras faixas de frequência para uma mesma programação básica, ao passo que o sistema SFN utiliza um único canal para cada programação distinta. Observando-se de outro modo, o poder público sempre outorgou canais não vinculados à programação, e isto aconteceu porque a tecnologia analógica permitia, dessa maneira, a expansão do serviço. Porém, o desenvolvimento da tecnologia permite, nos dias de hoje, uma distribuição de canais muito mais racional, podendo-se inclusive vincular a distribuição ao conteúdo, visto que o espectro eletromagnético se torna, cada vez mais, um bem escasso. A adoção do sistema SFN poderia ser imediata, porque devido às menores potências envolvidas, todas as relações de proteção do atual plano poderiam ser facilmente obedecidas. Algumas exceções iriam ocorrer como no caso de o canal da rede SFN ser o mesmo canal de uma outra estação analógica já existente em uma determinada cidade. Neste caso ocorre a condição de interferência de digital sobre analógico co-canal, e a relação a ser obedecida temporariamente seria +34 dB dentro do contorno protegido do canal analógico existente.

Este canal analógico seria posteriormente desligado e o canal da rede SFN poderia ser re-adequado se fosse o caso, lembrando que a executante do serviço de TV do canal analógico que foi desligado deve ter recebido um canal digital diferente do canal da rede SFN. Se este canal fosse de retransmissão possivelmente seria substituído por um canal SFN também.

## Capítulo 4

# Redes de Frequência Única

### 4.1 Definição de Rede de Frequência Única (SFN)

Um conjunto de transmissores, formando uma rede de frequência única, transmite simultaneamente a mesma informação dentro do mesmo canal de frequência. Este modo, de muitos transmitindo para muitos, supera com vantagens o modo de um transmitindo para muitos. Talvez seu uso acabe por adotar o termo Radiodifusão Simultânea ou *Simulcasting* no lugar de somente Radiodifusão ou *Broadcasting*.

Um novo conceito de rede de radiodifusão vem sendo exaustivamente estudado com o surgimento das modulações OFDM. Basicamente a definição deste novo sistema consiste em montar a rede de radiodifusão utilizando um único canal de frequência para a cobertura de uma área geográfica.

De [8] a Rede de Frequência Única é composta por dois ou mais transmissores que operam na mesma frequência, irradiam o mesmo programa, no mesmo instante de tempo. Este novo tipo de rede de radiodifusão é chamado de Rede de Frequência Única ou SFN (*Single Frequency Network*). Para serviços de radiodifusão onde são necessários canais com larga faixa de frequências como, por exemplo, a TV terrestre, este sistema oferece vantagens significativas, possibilitando um uso muito mais racional do espectro eletromagnético de frequências.

A Figura 4.1 mostra o modelo de radiodifusão utilizado para a TV analógica terrestre onde, excluindo-se o canal da geradora principal, são utilizados mais seis canais para a retransmissão de sinais.

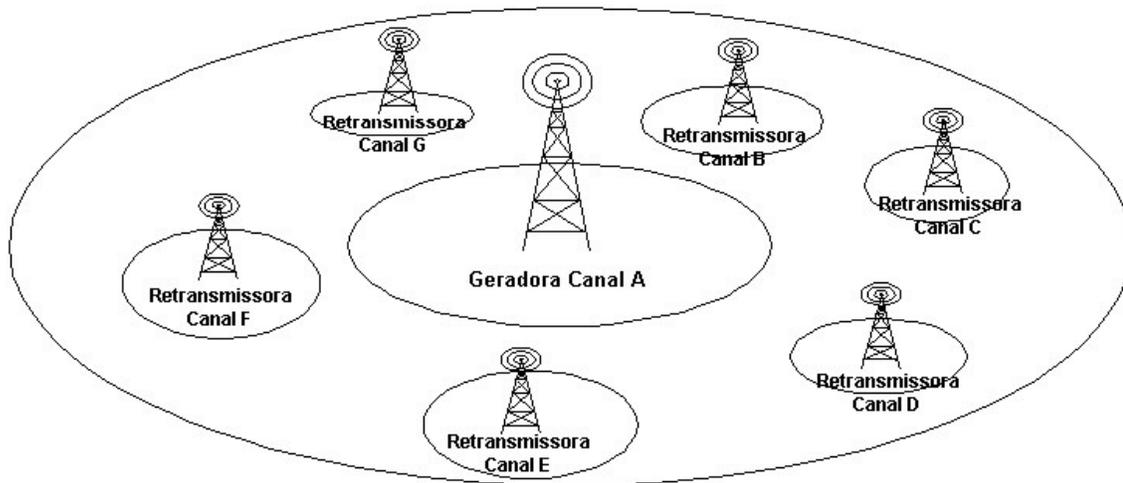


Figura 4.1 Rede MFN

Na Figura 4.2, a mesma área é coberta com uma Rede de Frequência Única, onde foram reaproveitados os postos retransmissores já existentes. Como se trata de uma ilustração não foi considerado o aumento ou diminuição de postos retransmissores.

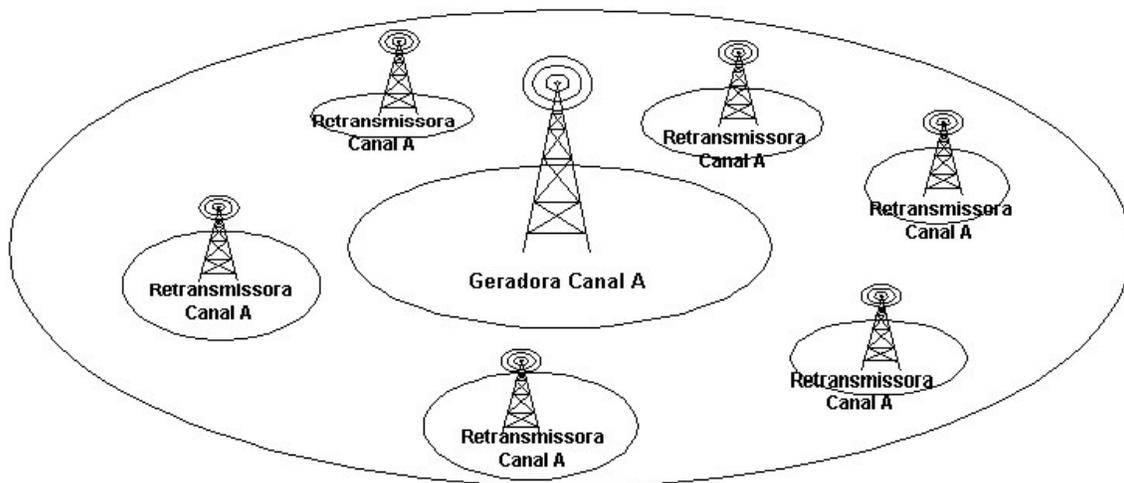


Figura 4.2 Rede SFN

Dois fatos são fundamentais para o planejamento de uma rede de frequência única. O primeiro deles é o conhecimento de como o sistema lidará com a interferência intersimbólica, que no caso da TV digital baseada em OFDM, é controlada com o uso do intervalo de guarda. O segundo ponto é a estratégia de sincronização dos receptores, mais difícil para sistemas baseados no OFDM. A área de cobertura será eficazmente alcançada se estes dois fatos forem adequadamente tratados.

Este conceito de rede é usado em sistemas já consagrados como o DAB e o DVB-T [25] e começa a ser utilizado pelo ISDB-T [26]. Entre diversos países que utilizam redes SFN cita-se Reino Unido, Espanha e Japão [27], [28] e também os Estados Unidos da América que com seu sistema ATSC começa a padronizar o que eles chamam de transmissão distribuída conforme referências [29], [30].

## 4.2 Modelo Matemático Utilizado para Rede SFN

Neste trabalho será considerado sinal de eco, ou simplesmente eco, o sinal que chega a antena com um determinado atraso.

Os modelos adotados para a caracterização dos sinais componentes de um sistema SFN necessitam de parâmetros muito mais restritivos, sendo que os primeiros modelos foram adotados pelo sistema DAB europeu [31],[32], onde os autores concluíram que o sistema capaz de prover uma boa qualidade de serviço necessita estar mais que 90% do tempo com ótima recepção dentro da área de operação da rede. Tal restrição se deve ao fato de o sinal digital sofrer degradação muito abrupta do sinal, devido às condições de propagação, ao contrário do sistema analógico que sofre a mesma degradação de forma muito mais suave.

Na Figura 4.3 conhecida como “Efeito *Cliff*” a situação descrita acima é esboçada em um gráfico.

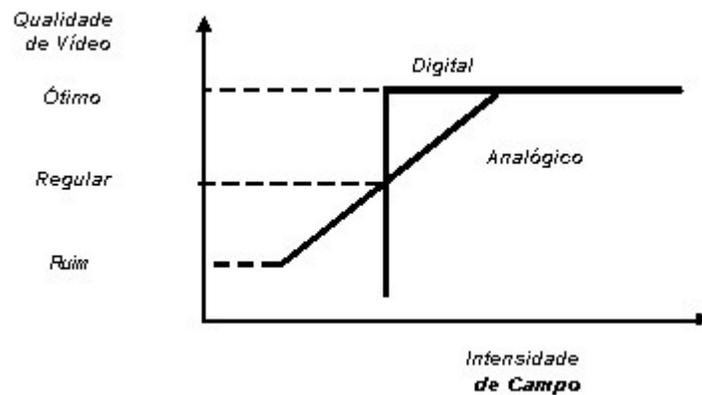


Figura 4.3 Degradação do sinal devido às condições de propagação

Uma rede SFN pode ser modelada através da equação a seguir.

$$s(t) = \sum_{i=1}^n h_i(t) \otimes x(t) + z(t) \quad (4.1)$$

onde  $\otimes$  denota convolução,  $x(t)$  é o sinal OFDM transmitido,  $h_i(t)$  a resposta ao impulso do canal do transmissor  $i$ , e  $z(t)$  o Ruído Gaussiano Branco Aditivo (AWGN).

A resposta ao impulso do canal pode ainda ser definida como

$$h_i(t) = \sum_{l=1}^M h_{i,l} \delta(t - \tau_{i,l}) \quad (4.2)$$

onde os ganhos de cada caminho do sinal,  $\{h_{i,l}; l=1, 2, \dots, M\}$ , são processos *Rayleigh* independentes e identicamente distribuídos.

A partir das Equações (4.1) e (4.2), nota-se que a rede proposta em SFN deverá lidar com dois tipos de atrasos: o primeiro devido às reflexões em obstáculos naturais, e o segundo tipo devido aos sinais transmitidos por outras estações transmissoras da rede. Esses atrasos podem causar uma interferência intersimbólica, que é geralmente administrada pelo uso do intervalo de guarda e estimação do canal.

Como na maioria dos modelos de sistemas de transmissão via ar, a rede SFN deverá lidar com dois tipos de desvanecimento: o primeiro chamado de desvanecimento rápido e o segundo de desvanecimento lento [33]. Essas degradações do sinal, geralmente, são modeladas em termos de funções determinísticas descrevendo as perdas em função da distância e localização dos receptores.

O desvanecimento lento é modelado em função dos grandes obstáculos naturais do terreno e o desvanecimento rápido é modelado pelo espalhamento do sinal nas vizinhanças do receptor. Outros importantes parâmetros são a diretividade das antenas, a potência efetiva irradiada e as características do terreno. Nesta proposta de rede SFN, para a televisão aberta digital, será usado no exemplo dado um único canal.

A Figura 4.4 mostra que o sinal resultante é uma combinação de três sinais, um de cada transmissor. O sinal proveniente de cada transmissor chega à antena do receptor com uma dispersão temporal, com características dadas pelo canal de transmissão percorrido pelo sinal. Na Figura 4.4(a), os três sinais chegam com amplitudes semelhantes e o atraso entre eles é nulo, ou muito pequeno - situação conhecida como “eco de 0 dB e atraso nulo”. Uma outra característica nesse ponto é que a relação sinal-ruído é pequena. Na Figura 4.4(b), ocorre a condição em que dois sinais chegam à antena receptora com atraso nulo e com potência relativa de 0 dB e, o terceiro, chega atrasado em relação aos outros dois sinais. Como

as distâncias entre as estações transmissoras analógicas variam, tipicamente, entre 25 e 70 Km, adotou-se, para este exemplo, um raio de cobertura de 60 Km. Adotando-se para o raio de cobertura esse valor, o sinal do transmissor B chega com um atraso total de 60  $\mu$ s. No último caso, Figura 4.4(c), o sinal mais potente é o do transmissor A, seguido por outros dois sinais com atrasos diferentes. Tomando-se o mesmo raio de cobertura de 60 Km, ocorrem atrasos de 67 e 105  $\mu$ s, respectivamente referentes às estações transmissoras B e C.

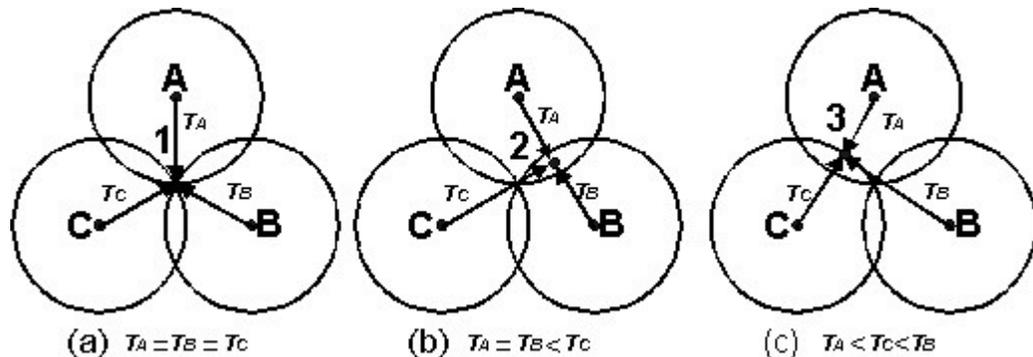


Figura 4.4 Localizações importantes para análise em uma SFN.

As regiões do mundo, que estão utilizando redes SFN, estão adotando os modos de transmissão 8K segundo as normas DVBT (*Digital Video Broadcasting Terrestrial*) e ISDBT (*Integrated Services Digital Broadcasting Terrestrial*) para que os atrasos de sinais não ultrapassem os intervalos de guarda do sistema. Uma configuração típica de intervalo de guarda 1/8, usando o modo 8 K para padrões OFDM, gera uma faixa de aproximadamente 150  $\mu$ s. Como o intervalo de guarda é maior do que o maior atraso dos sinais das várias estações transmissoras que chegam ao receptor, o receptor poderá combiná-los construtivamente. As técnicas de estimação de canal deverão ser suficientes para compensar os atrasos descritos e equalizar ecos com essa ordem de dispersão temporal.

O envio do sinal da estação geradora para as estações retransmissoras pode ser realizado através de três formas principais: enlaces de fibras ópticas, enlaces de microondas ou pelo próprio sinal do canal. Devido aos custos proibitivos, os enlaces ópticos não são utilizados para retransmissão de sinais no Brasil. A proposta ideal para uma rede SFN é aquela em que um posto retransmissor da rede recebe o mesmo sinal que será transmitido na mesma frequência. Para isso, é necessário um aprimoramento dos filtros de cancelamento de realimentação (LCF - *Loop Canceller Filter*) [34]. Com esse procedimento, é possível evitar os dispendiosos elos de microondas ponto a ponto que levam para o posto retransmissor o

sinal a ser transmitido como acontece em muitos casos reais. A rede SFN também pode operar com *Gap-filler* para melhoria de recepção em locais extremamente problemáticos de sombra, assim como é feito hoje no sistema analógico.

De [35], [32] fazendo a decomposição dos sinais que chegam no receptor e redesenhando o receptor OFDM na Figura 4.5.

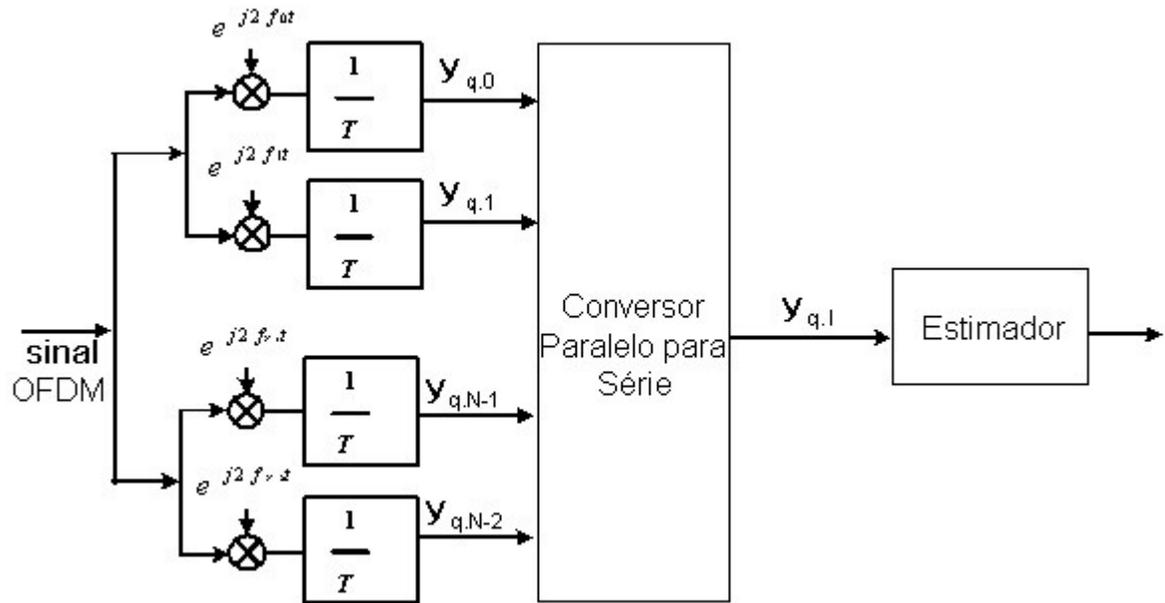


Figura 4.5 Ilustração de um receptor OFDM Simplificado

pode-se escrever a saída complexa do  $q$ :ésimo campo OFDM na portadora  $k$  é representado por  $y_{q,k}$  sendo obtido como:

$$y_{0,k} = \frac{1}{T} \int_0^T \left( \sum_{i=1}^n h_{i(t)} \otimes \chi(t) \right) g_k^*(t) dt + z_k \quad (4.3)$$

onde  $g_k^*(t) = e^{-j2\pi f_k t}$  para  $0 \leq t \leq T$ , assumindo q de  $y_{q,k}$  igual a zero e  $z_k$  é a componente de ruído na portadora k.

Em [32], [35], o canal para o transmissor  $i$  foi modelado como um canal de desvanecimento Rayleigh WSSUS (*Wide Sense Stationary Uncorrelated Scattering*), ou seja, como processos de espalhamento

estacionários decorrelacionados em sentido amplo entre si [33], descritos pela sua resposta impulsiva como mostrado na Equação 4.2.

Assumindo que o canal apresenta uma variação muito lenta se comparada à taxa de símbolo do sinal e usando as propriedades de linearidade mostrada na Equação 4.3 é possível escrever a saída após a correlação do sinal como mostra a Equação 4.4.

$$\begin{aligned}
 y_{0,k} &= \sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{T} \int_0^T (h_i(t) \otimes x(t)) g_k^*(t) dt \right) + z_k \\
 y_{0,k} &= \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^M \frac{1}{T} \int_0^T h_{i,l} x(t - \tau_{i,l}) g_k^*(t) dt + z_k \\
 y_{0,k} &= \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^M \frac{1}{T} \int_0^T \hat{y}_{0,k}(\tau_{i,l}) + z_k
 \end{aligned} \tag{4.4}$$

onde  $\hat{y}_{ok}(\tau_{i,l})$  é a saída depois da correlação do caminho com um atraso de  $(\tau_{i,l})$ .

A Equação 4.4 mostra que é possível analisar a contribuição de sinal de cada caminho separadamente, onde foi assumido que o receptor está sincronizado no primeiro sinal que chega à antena. A análise prossegue a partir de um único caminho de cada vez depois da correlação, para que se chegue a potência útil e a potência interferente do sinal.

Dois situações distintas podem ser analisadas separadamente conforme mostra Figura 4.6.

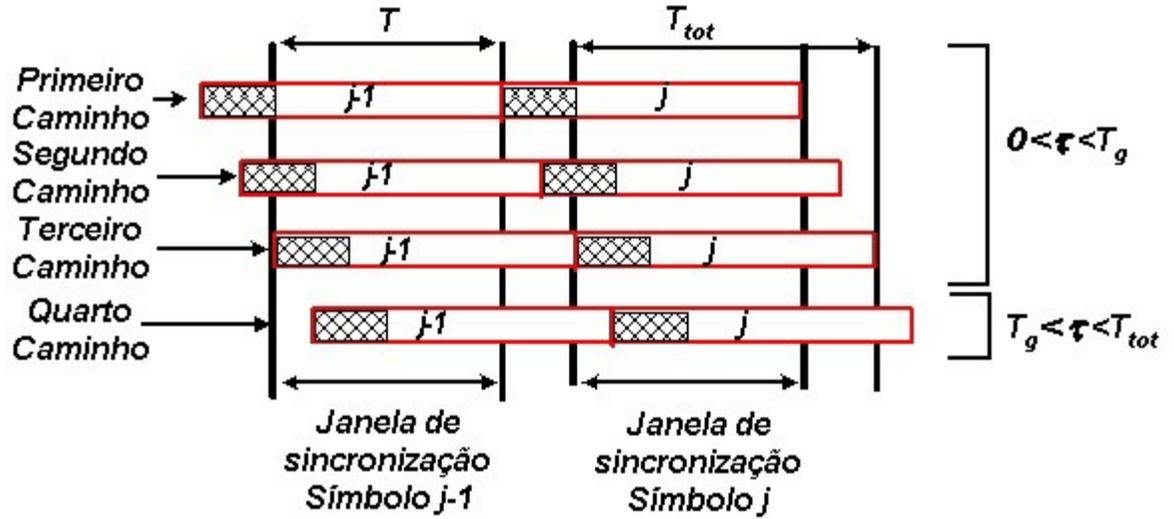


Figura 4.6 Diferentes atrasos do sinal em sua propagação

No primeiro caso o sinal chega dentro do intervalo de sincronização do receptor e portanto não ocorre interferência intersimbólica. Na segunda situação o sinal que chega tem parte dentro do período de sincronização do receptor e a outra parte do sinal está fora deste período sobrepondo-se na próxima janela de sincronização. Considerando um canal ideal sem ruído obtêm-se para  $0 \leq \tau \leq T_g$ .

$$\hat{y}_{0,k}(\tau) = h e^{-j2\pi f_k \tau} D_{0,k} \quad (4.5)$$

onde  $D_{0,k}$  é o símbolo transmitido na frequência  $f_k$ . Observa-se que neste caso não ocorre perda de ortogonalidade.

No segundo caso analisado em [32], [35], tem-se  $T_g \leq \tau \leq T_{tot}$ , sendo que a saída depois da correlação agora depende do símbolo previamente transmitido ( $q = -1$ ) e do símbolo ( $q = 0$ ) atual, que resulta em:

$$\hat{y}_{0,k}(\tau) = h \left( \mu_{kk}(\tau) D_{0,k} + \sum_{l=0, l \neq k}^{N-1} \mu_{lk}(\tau) D_{0,l} + \sum_{l=0}^{N-1} \lambda_{lk}(\tau) D_{-1,l} \right) \quad (4.6)$$

Na Equação 4.6, o primeiro termo dentro dos parênteses é a parcela útil do sinal, o segundo termo corresponde à interferência causada pela perda de ortogonalidade do quadro OFDM presente, enquanto o terceiro termo representa a interferência do quadro OFDM anterior.

A interferência em uma determinada portadora descrita pela Equação 4.6 consiste de um conjunto de variáveis estocásticas complexas com praticamente a mesma variância. Geralmente quando o conjunto de variáveis é muito grande, o teorema do limite central pode ser aplicado e a interferência pode ser aproximada por uma distribuição Gaussiana complexa conduzindo a uma interferência com uma distribuição Rayleigh com a fase uniformemente distribuída entre  $\{-\pi, +\pi\}$ . Porém, existem autores que não consideram válida esta aproximação, admitindo que as componentes interferentes têm diferentes variâncias seguindo uma distribuição de Rice. A literatura [15], [16], [17] é farta em modelos estatísticos de sinais transmitidos através de canais usando a distribuição de Rice. Neste caso o modelo seria um sinal forte direto com ruído AWGN (*Additive White Gaussian Noise*).

## 4.2.1 Função Peso para Divisão entre Potência Útil e Interferente

A potência útil pode ser expressa por uma função peso que divide a potência total do sinal recebido em uma parte útil e uma parte interferente. Assim sendo o sinal proveniente de todos os atrasos recebidos dentro do intervalo de tempo do intervalo de guarda  $\Delta$  são considerados úteis e contribuem positivamente para a potencia total disponível do sinal que chega na antena.

Analisando o sinal que chega fora do intervalo de guarda, parte deste sinal é pertencente ao símbolo OFDM principal, sinal que sincroniza a janela FFT, e portanto também contribui positivamente para a potencia total disponível do sinal.

Restando portanto, aquela parte do sinal que está fora do intervalo de guarda e é associada ao símbolo OFDM prévio ou posterior produzindo interferência intersimbólica ISI que pode ser modelada matematicamente como uma interferência de ruído gaussiano descorrelacionado. Esta interferência também pode causar a perda de ortogonalidade das portadoras causando uma interferência interportadoras ICI.

Logo se o atraso do sinal for maior ou igual a um símbolo OFDM ele será totalmente interferente em relação ao sinal principal e não terá nenhuma parte contributiva. Em [36], [37], [32] dentre outros, são deduzidas as fórmulas matemáticas que expressam a divisão do sinal em componente útil e componente interferente. Como existe farta literatura a respeito, serão apresentados neste trabalho somente os

resultados finais. Porém, é preciso ter em mente que o sinal interferente, seja qual serviço for, sempre estará limitado pela relação de contorno protegido estabelecido para o serviço em questão.

A Figura 4.7 e a Equação 4.7 mostram matematicamente e graficamente a divisão do sinal entre parte contributiva e parte interferente, observa-se que o eco interferente é progressivamente aumentado quando se ultrapassa o intervalo de guarda, conseqüentemente a parte útil do sinal decresce e a interferência intersimbólica aumenta quadraticamente.

$$Q(\tau) = \begin{cases} (1+\gamma)^2 & -T \leq \tau \leq 0 \\ 1 & 0 \leq \tau \leq T_g \\ (1-\alpha)^2 & T_g \leq \tau \leq T+T_g \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4.7)$$

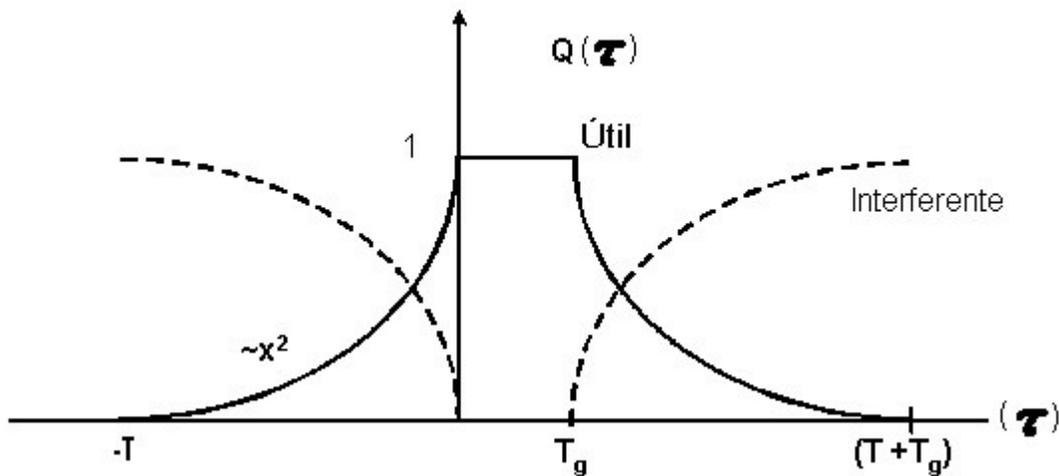


Figura 4.7 Função  $Q(\tau)$  entre Potência Útil e Interferente para Sistemas Convencionais OFDM

Em [38] é utilizada a função  $L(\tau)$  e  $-L(\tau)$  mostrada na Figura 4.8.

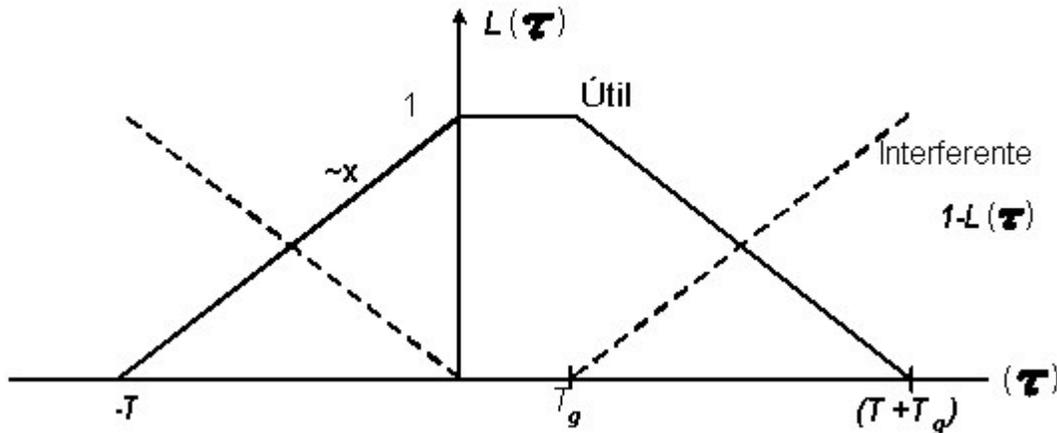


Figura 4.8 Função  $L(\tau)$  utilizada para relação de Potência Útil - Interferente

Como outro exemplo, a Figura 4.8 mostra a função proposta por [35] e [38], denotada por  $L(\tau)$  e  $(1-L(\tau))$ , que se apresenta muito otimista, uma vez que a potência útil é assumida ser diretamente proporcional ao grau de sobreposição no símbolo seguinte. Fica claro que várias funções são possíveis para se descrever a divisão da relação entre a potência útil e interferente do sinal, porém, para os projetistas de redes, é desejável que as regras de projeto sejam as mesmas, independente da função utilizada.

Os exemplos citados acima estão de acordo com o sistema de áudio europeu DAB que tem uma modulação diferencial mas para o sistema de TV digital que apresenta uma demodulação coerente apresentará diferenças no sinal interferente que está além do intervalo de guarda.

Para alcançar a demodulação coerente, os sistemas que utilizam portadoras piloto geralmente equalizam a amplitude e a fase das portadoras de dados, dividindo as amostras recebidas (depois da implementação da FFT) para estimar a resposta em frequência do canal. Os receptores comuns fazem a estimação do canal através da interpolação das portadoras piloto, que são inseridas em intervalos regulares na transmissão do símbolo OFDM [37].

Diferentemente da Figura 4.7 e 4.8, sistemas que utilizam demodulação coerente como o DVB e o ISDB estimam a resposta em frequência do canal. Esta estimação, antes da interpolação em frequência é sub amostrada de uma razão de 1/3 (uma portadora piloto a cada três portadoras), portanto sua transformada de Fourier, que corresponde a resposta impulsiva do canal estimada, é periódica com período de  $T_u/3$  onde  $T_u$  é o período útil do símbolo. Sendo  $T_f = T_u/3$  e  $T_f$ , doravante chamado de Intervalo Correto de Equalização, que vai de zero até pelo menos  $T_g$  que é o Intervalo de Guarda, assim sendo ocorre uma boa estimação dos ecos dentro do intervalo de guarda.

O valor  $T_u/3$  é considerado como um limite teórico para  $T_f$ , sendo que na prática é utilizado o valor de  $T_f = 7.T_u/24$ , para projeto de receptores comuns. A figura 4.9 mostra o modelo para demodulação coerente.

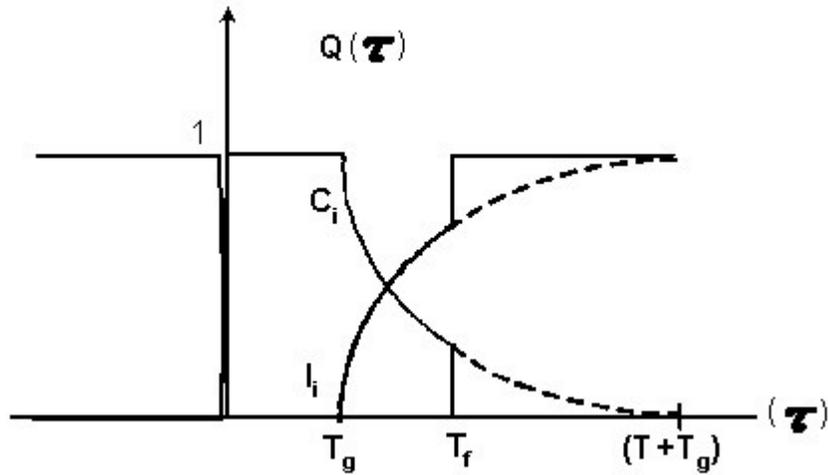


Figura 4.9 Modelo para divisão do sinal em útil e interferente usando demodulação coerente

A Equação 4.8 representa o correspondente matemático da Figura 4.9.

$$W_i = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 1 & 0 \leq t \leq Tg \\ \left( \frac{T_u - t + Tg}{T_u} \right)^2 & Tg < t \leq Tf \\ 0 & t > Tf \end{cases} \quad (4.8)$$

### 4.3 Sincronização do Receptor

As soluções de sincronização dos receptores são de escolha livre dos fabricantes, já que não são normalizadas, havendo apenas recomendações sobre a recepção. Assim sendo, são segredos bem guardados e não divulgados, porém é de grande importância se conhecer as estratégias adotadas para a sincronização, visto que isto afetará diretamente o comportamento do receptor em um ambiente de rede de frequência única.

Na análise de Brugger e Hemingway [39], observa-se que o receptor OFDM pode sincronizar com o sinal recebido em dois passos iniciais sendo o primeiro quando o receptor é sincronizado com a taxa de bits por segundo do sinal, ou seja, o receptor se sincroniza com a velocidade do sinal que chega na antena, e como segundo passo, o receptor posiciona sua janela de amostragem da Transformada de Fourier para demodular o sinal OFDM.

A sincronização do primeiro passo descrito anteriormente, é feita por correlação de amostras tomadas periodicamente a cada intervalo da parte útil do símbolo. Quando a forma de onda do sinal se repete, como mostrado na Figura 4.10, a saída do correlator excede a um valor predeterminado, e a partir deste ponto o receptor pode detectar o início de um novo símbolo que chega na antena. Resumindo, quando a saída do correlator é 1, acontece a máxima correlação, o que significa dizer que o receptor está sincronizado com um único símbolo se alinhando com a taxa de bits do sinal da antena.

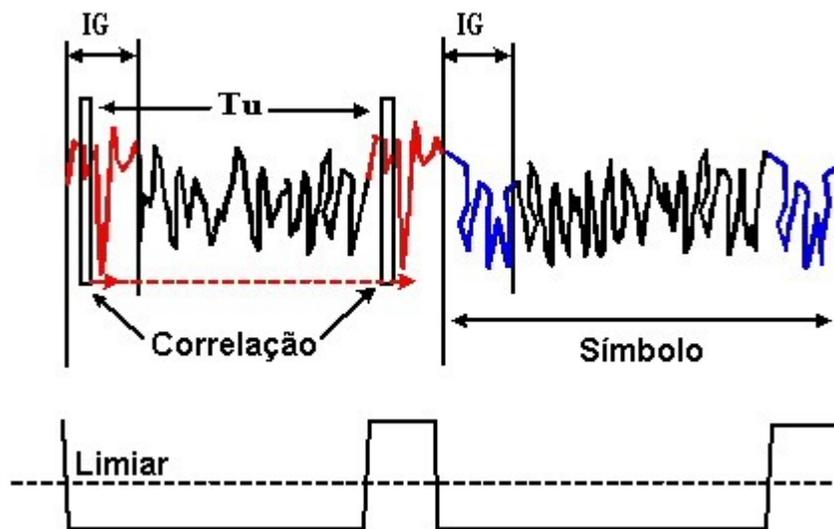


Figura 4.10 Primeiro Passo de Sincronização

Convém notar que a saída do correlator será máxima durante o intervalo de tempo igual ao intervalo de tempo de guarda. Porém o receptor ainda não achou a melhor posição para a janela FFT, ou seja, ainda necessita de um ajuste fino. Esta tarefa é mais complicada em um ambiente de muitos sinais chegando à antena, múltiplos ecos, logo várias estratégias são utilizadas pelos fabricantes de receptores para resolver o problema.

### 4.3.1 Estratégia do Sinal Mais Forte

A estratégia de sincronização do receptor pelo sinal mais forte que chega a antena aparece como a solução mais natural a ser implementada pelos fabricantes. Na Figura 4.11, são mostrados cinco sinais que chegam a antena de um determinado receptor.

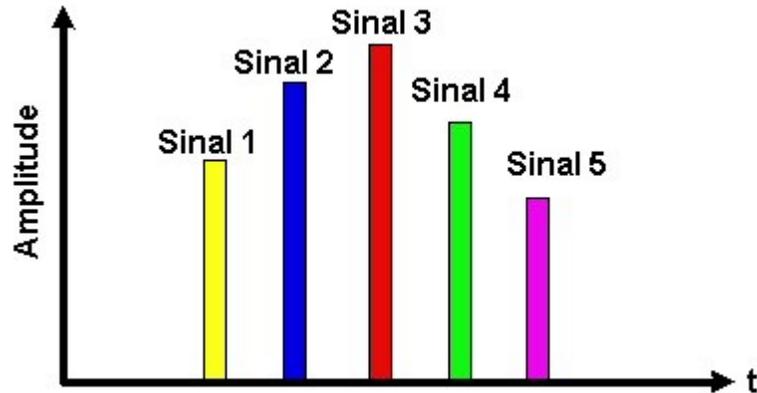


Figura 4.11 Sincronização no Sinal mais Forte

Neste caso, os sinais 1 e 2 aparecem para o receptor como pré-ecos, e poderiam ser provenientes de reflexões de sinal de transmissores mais próximos do receptor do que o transmissor 3. Os sinais 4 e 5 aparecem como pós-ecos para o receptor. Como os sinais apresentam amplitudes relativas próximas do sinal mais forte, será adotada a posição central do sinal 3 para posicionamento da janela FFT. A situação proposta pode ser vista na Figura 4.12.

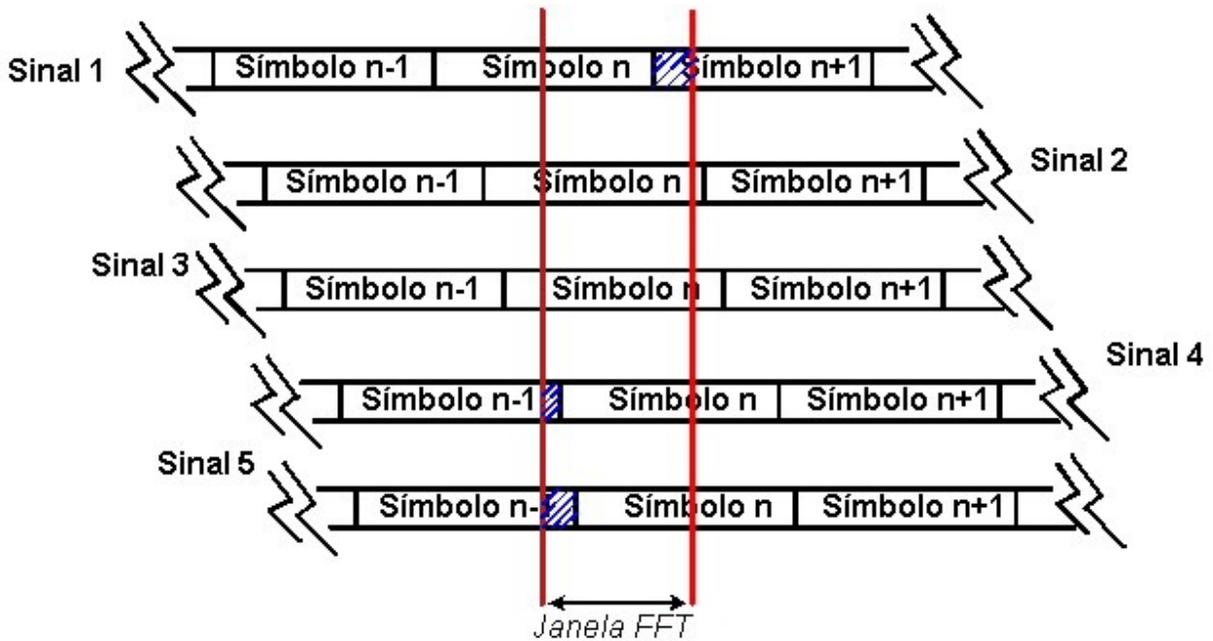


Figura 4.12 Sincronização no Sinal 3, mais Forte

Da Figura 4.12, pode-se observar que a sincronização fixa no centro do sinal mais forte 3, pode não ser a ideal, logo o receptor pode utilizar-se da estratégia de mover ligeiramente a janela FFT para um ponto ótimo, onde a maioria dos sinais fosse contributiva, eliminando a maior parte da interferência intersimbólica da situação. Indo um pouco mais além, esta movimentação poderia ser dinâmica acompanhando as variações do canal no caso de uma recepção móvel, por exemplo.

### 4.3.2 Estratégia do Centro de Gravidade

Este método faz o receptor analisar a situação da resposta ao impulso dos sinais e calcular o centro de gravidade do espectro posicionando aí a janela FFT seguindo a Equação 4.9 abaixo,

$$t_c = \frac{\sum_i p_i t_i}{\sum_i p_i} \quad (4.9)$$

onde  $t_c$  = centro de gravidade

$p_i$  = potência da resposta ao impulso do  $i$ ésimo sinal

$t_i$  = instante da resposta ao impulso do  $i$ -ésimo sinal

A Figura 4.13 (13) mostra a situação da resposta ao impulso dos sinais para o caso do centro de gravidade indicado pela linha tracejada, e a Figura 4.14 mostra a posição da janela FFT para os sinais.

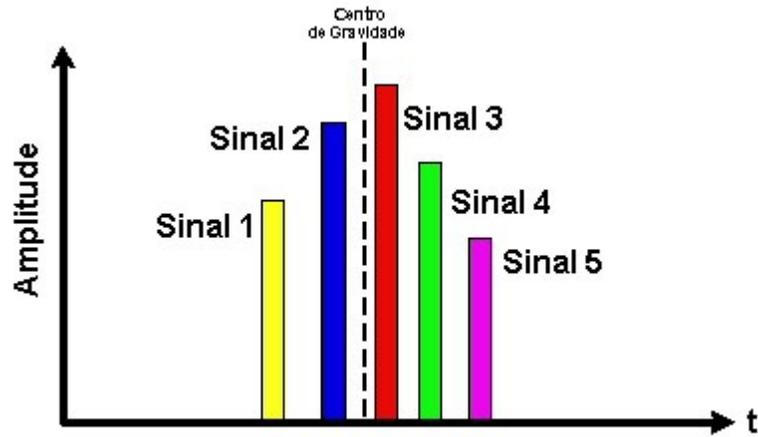


Figura 4.13 Situação da Resposta ao Impulso dos Sinais

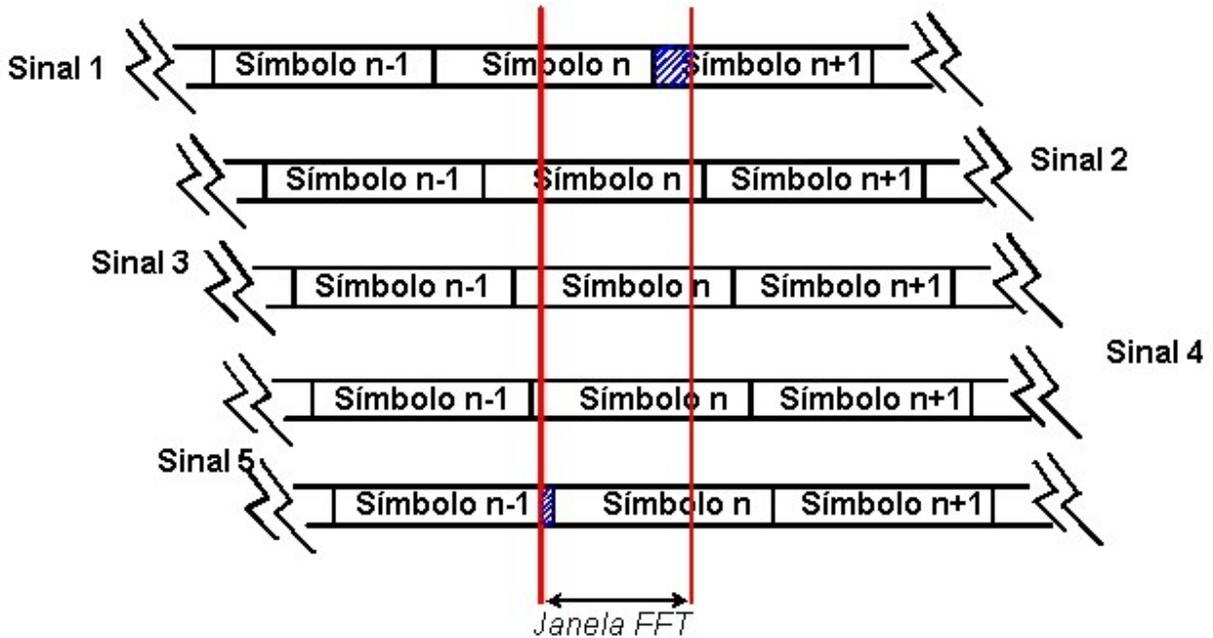


Figura 4.14 Sincronização através do Método do Centro de Gravidade

### 4.3.3 Estratégia do Primeiro Sinal Acima do Limiar

Esta estratégia toma o primeiro sinal do conjunto de respostas ao impulso dos sinais como referência para posicionar a janela FFT, acima de um determinado limiar. A Figura 4.15 mostra a situação para a resposta ao impulso dos sinais.

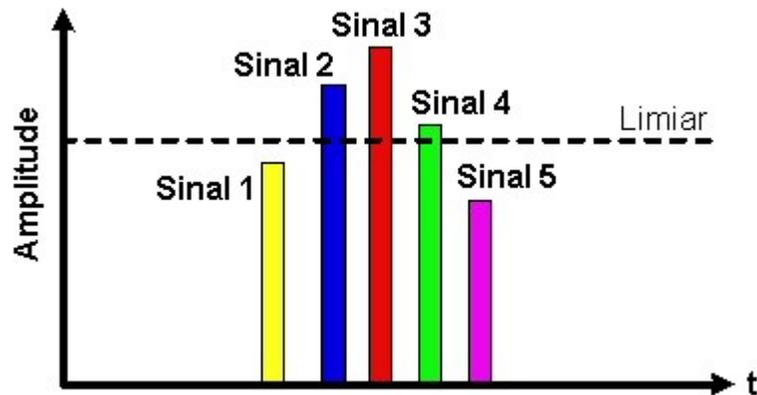


Figura 4.15 Situação da Resposta ao Impulso dos Sinais Destacando o Nível Limiar

A Figura 4.16 mostra a janela FFT onde o sinal escolhido para sincronização é o sinal 2.

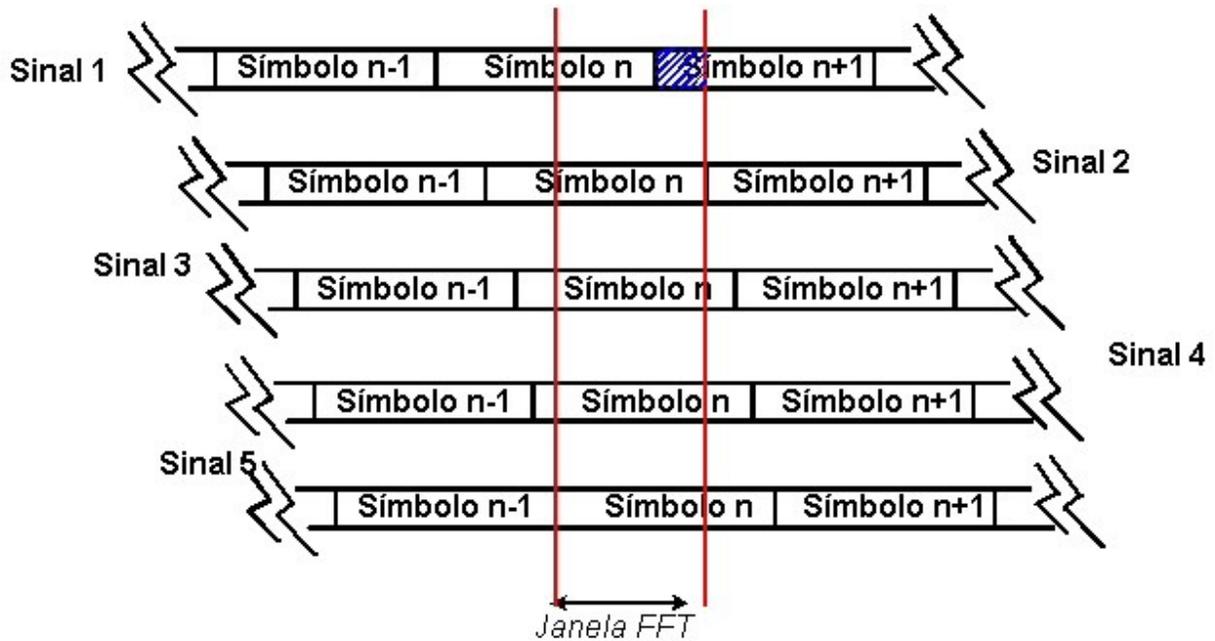


Figura 4.16 Sincronização do Primeiro Sinal acima do Limiar (Sinal 2).

Observa-se que o primeiro sinal acima do limiar é o sinal 2, que servirá para posicionar a janela FFT. Espera-se que aqui também seja utilizada a estratégia de deslocamento da janela FFT dentro da referência do sinal 2 para a melhor otimização do sincronismo. A escolha do valor limiar de sincronização pode ser tal qual a intensidade mínima de campo requerida ou, mais praticamente, um valor considerado pelos fabricantes como de 6 a 10 dB, abaixo do sinal mais forte.

#### 4.3.4 Método “Quasi-Ótimo” e Máxima Relação C/I

Á estratégia “Quasi-Ótima” é semelhante à estratégia vista em 4.3.3, porém levando em conta a relação C/I segundo o diagrama de fluxo da Figura 4.17.

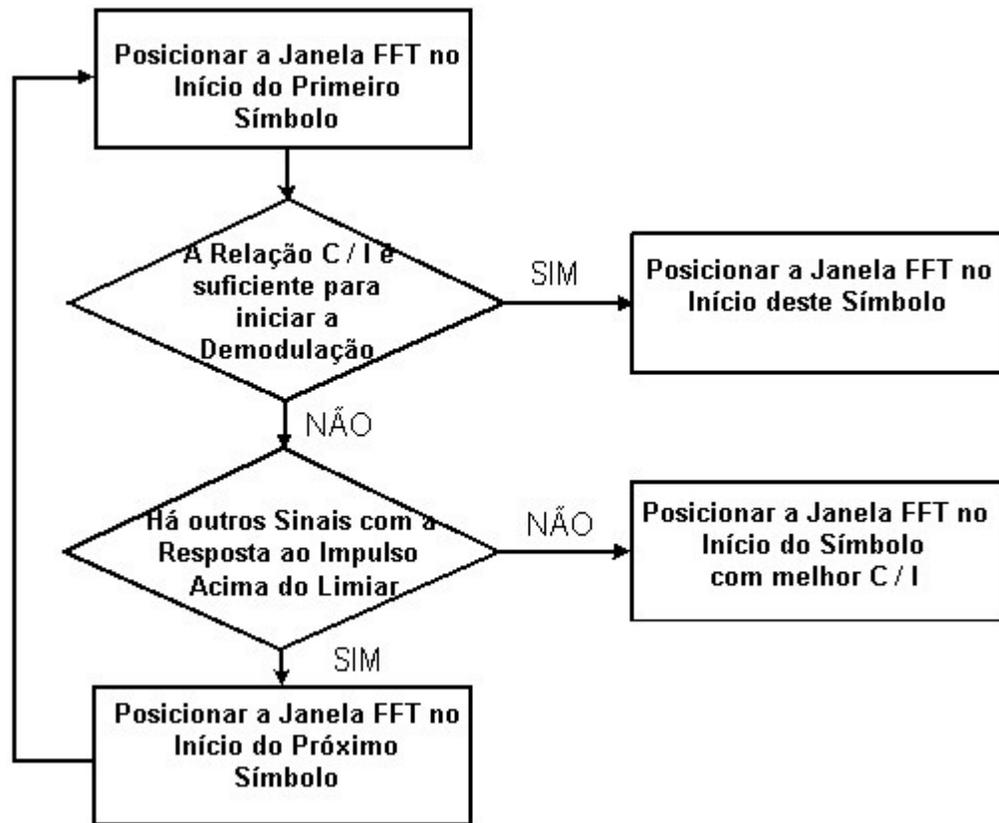


Figura 4.17 Diagramas de Fluxo descrevendo a Estratégia “QuasiÓtima”

A estratégia de Máxima Relação C/I, segundo os fabricantes, é complexa principalmente para grandes intervalos de guarda (IG). Um exemplo disso é quando  $IG = T_u/4$ , valor máximo permitido nas normas de padrões de TV Digital, sendo  $T_u$  o tempo útil de símbolo, onde existem dificuldades para a avaliação da relação C/I. Se comparada às estratégias comentadas anteriormente sua aplicação traria pouco ganho em relação aos erros introduzidos por outras técnicas.

### 4.3.5 Ruído Impulsivo e Filtro LCF

Fontes típicas de ruído impulsivo são as faíscas de comutação de corrente em motores elétricos, chaves, centelhas de descargas de velas em motores de automóveis, etc.

Em geral, é produzido por equipamentos elétricos ou eletrônicos, mas também pode ser produzido por descargas atmosféricas. O ruído impulsivo se caracteriza por possuir alta energia num intervalo relativamente curto de tempo. Considera-se que os impulsos de ruído se apresentam para o receptor como uma perturbação de faixa larga com espectro plano na faixa do sinal OFDM. A cada portadora recebida será adicionado um vetor de ruído, de mesma amplitude mas fase possivelmente diferente.

A demodulação resultará numa constelação de pontos onde ocorrem deslocamentos, de mesma distância, mas em direções diferentes. O ruído impulsivo atinge todos os símbolos uniformemente, porém seu efeito sobre cada símbolo detectado pode ser feito insignificante se o tamanho dos blocos de símbolo for suficientemente grande. Em [40] pode-se avaliar a performance de transmissão do sistema ISDB-T.

Para que uma rede SFN seja operacional, é necessário prover meios para alimentar os postos de retransmissão com o sinal a ser irradiado. Três opções se apresentam: enlaces de microondas, enlaces ópticos (não utilizado no Brasil) e alimentação através de captação do sinal no AR.

O enlace de microondas é o sistema mais utilizado para a retransmissão terrestre de sinais de TV, porém apresenta como desvantagem o custo elevado. A captação do sinal do ar, quando o sistema é MFN, é realizada de um canal qualquer e o retransmite em outro canal para a região de interesse. Se o sistema for SFN, esta operação torna-se complicada, porque o canal é o mesmo, portanto existe a necessidade de se evitar que o sinal transmitido no próprio posto não sature a entrada do receptor que está no mesmo local.

De [24], [41], [34] foi desenvolvido um filtro que cancela o elo de realimentação da antena transmissora para a antena receptora chamado de LCF (*Loop Canceller Filter*). Este filtro promete que seja possível a recepção e a transmissão no mesmo local, dispensando o uso dos dispendiosos enlaces de microondas.

A Figura LCF mostra um esquema básico do princípio de funcionamento deste filtro.

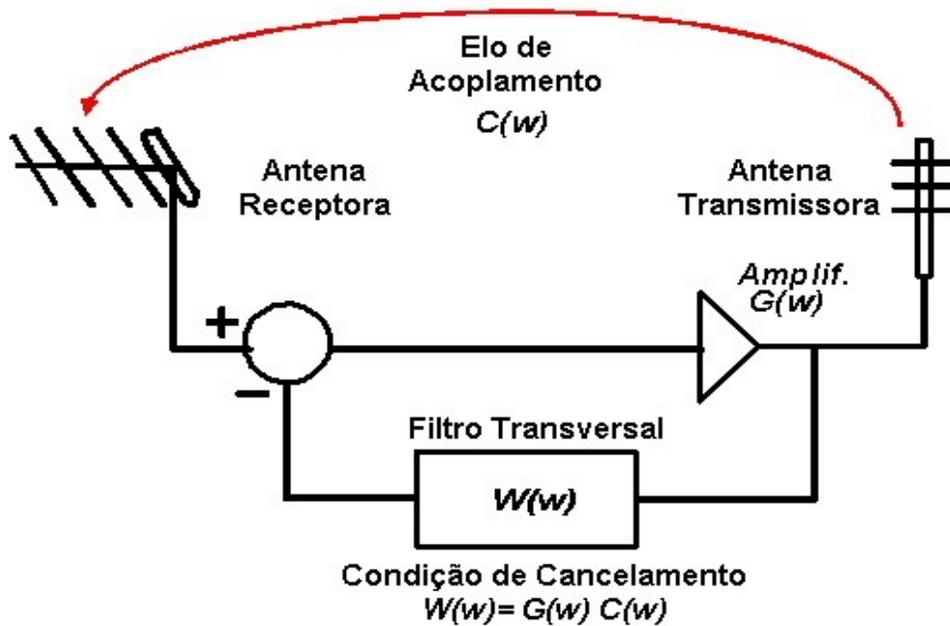


Figura 4.18 LCF Filtro Cancelador de Elo Realimentação

#### 4. 4 Comentários

Como visto anteriormente as estratégias de sincronização dos receptores OFDM estão muito evoluídas e tendem a evoluir ainda mais. Isso é muito importante para o funcionamento do receptor em um ambiente de rede de frequência única, porque o receptor poderá tirar o máximo proveito dos sinais contributivos que chegam à antena. Então, torna-se importante que nas áreas de intersecção para um mesmo sinal aconteça um ambiente de contribuição, e para sinais diferentes, é importante que sejam observados os níveis de sinal estipulados para o serviço, evitando-se interferências como será visto no próximo capítulo.

## **Capítulo 5**

### **Simulação e Resultados**

#### **5.1 Caracterização da Rede de Retransmissão Analógica**

Como base para as simulações, foram utilizados os mesmos locais dos postos existentes da atual rede de retransmissão analógica. Isso certamente irá acontecer porque o uso da mesma infraestrutura de transmissão como torres, abrigos dos transmissores, em geral, serão reutilizados pelas emissoras de TV com objetivo de se reduzirem os custos de instalação da nova rede digital. A simulação deverá montar a rede digital no sistema de frequência única e deverá apontar as diferenças deste planejamento para o planejamento digital em multi frequência.

O planejamento admite todos os postos sincronizados em tempo, ou seja, transmitindo simultaneamente, sendo que esta questão será discutida brevemente ao final do capítulo. A questão de que se, em um primeiro momento, a sincronização dos transmissores será necessária ou não, levando-se em conta os parâmetros do PBTVD, e também uma visão aproximada do sinal nas principais rodovias da região em uma possível recepção móvel do canal, também será brevemente discutida. Será adotada neste trabalho a seguinte nomenclatura: o número do canal seguido da letra D para indicar canal Digital, e número do canal seguido da letra A para indicar canal Analógico.

A rede de retransmissão utilizada na TV aberta é formada por postos que operam em diferentes canais. A rede utilizada neste estudo contém uma geradora principal onde se localiza o estúdio, e seu

sinal é enviado aos postos retransmissores por elos de microondas, mas em alguns casos o sinal é captado do ar e, em seguida, retransmitido em um novo canal.

A área total de cobertura da rede é de aproximadamente 9.000 km<sup>2</sup>. Esta área compreende cidades que trafegam o mesmo sinal, porém a responsabilidade de retransmissão do sinal não é só da geradora principal, mas também de algumas prefeituras locais. A área é formada por uma geradora principal e vinte postos retransmissores. Os postos de responsabilidade de prefeituras foram considerados porque não é de interesse da geradora principal que sua área de cobertura seja diminuída.

A Tabela 5.1 mostra a geradora principal, os postos retransmissores e as cidades cobertas.

Tabela 5.1 Situação de uma Rede de Retransmissão Analógica

LOCAL	SITUAÇÃO	COBERTURA
Campinas	Geradora Principal Estúdio Canal VHF 12	Campinas, Americana, Artur Nogueira, Cosmópolis, Elias Fausto, Holambra, Hortolândia, Jaguariúna, Louveira, Mombuca, Monte Mor, Nova Odessa, Paulínia, Pedra Bela, Santo Antônio da Posse, Sumaré, Valinhos e Vinhedo
Águas de Lindóia	Posto Retransmissor Canal VHF 08	Águas de Lindóia
Amparo	Posto Retransmissor Canal UHF 42	Monte Alegre do Sul
Araras	Posto Retransmissor Canal UHF 16	Araras
Capivari	Posto Retransmissor Canal UHF 42	Rafard
Conchal	Posto Retransmissor Canal UHF 31	Conchal
Indaiatuba	Posto Retransmissor Canal UHF 41	Indaiatuba
Limeira	Posto Retransmissor Canal UHF 20	Cordeirópolis, Engenheiro Coelho, Iracemópolis, Limeira
Mogi Guaçu	Posto Retransmissor Canal UHF 53	Estiva Gerbi, Mogi Guaçu, Mogi Mirim
Piracicaba	Posto Retransmissor Canal VHF 08	Charqueada, Ipeúna, Piracicaba, Rio das Pedras, Saltinho,
Santa Bárbara D'Oeste	Posto Retransmissor Canal UHF 40	Santa Bárbara D'Oeste
São Pedro	Posto Retransmissor Canal UHF 39	Águas de São Pedro, São Pedro
Valinhos	Posto Retransmissor Canal UHF 48	Louveira, Vinhedo, Valinhos
Espírito Santo do Pinhal	Posto Retransmissor Canal UHF 26 Prefeitura	Espírito Santo do Pinhal, Santo Antônio do Jardim

Itapira	Posto Retransmissor Canal UHF 35 Prefeitura	Itapira
Morungaba	Posto Retransmissor Canal UHF 31 Prefeitura	Morungaba
Pedreira	Posto Retransmissor Canal UHF 19 Prefeitura	Pedreira
Pinhalzinho	Posto Retransmissor Canal UHF 21 Prefeitura	Pinhalzinho
Serra Negra	Posto Retransmissor Canal UHF 20 Prefeitura	Serra Negra
Socorro	Posto Retransmissor Canal UHF 28 Prefeitura	Socorro
Tuiuti	Posto Retransmissor Canal UHF 33 Prefeitura	Tuiuti

Da Tabela 5.1, observa-se que são necessários dezessete canais, sendo que três deles são reutilizados duas vezes, explicitando o conjunto vem: canal 08 A, canal 12 A, canal 16 A, canal 19 A, canal 20 A, canal 21 A, canal 26 A, canal 28 A, canal 31 A, canal 33 A, canal 35 A, canal 39 A, canal 40 A, canal 41 A, canal 42 A, canal 48 A, canal 53 A, onde os canais 08, 31, e 42 são reutilizados duas vezes, neste caso não se considerando outras executantes do serviço. Os postos retransmissores sob a responsabilidade das prefeituras totalizam oito postos: Espírito Santo do Pinhal, Itapira, Morungaba, Pedreira, Pinhalzinho, Serra Negra, Socorro e Tuiuti.

Conclui-se que, em geral, o sistema MFN analógico utiliza praticamente um canal diferente para cada cidade, principalmente se o canal for de responsabilidade da prefeitura local, onde o interesse era cobrir somente a cidade local.

Outra característica da rede é o fato de que todos os postos pertencentes às prefeituras não são alimentados por enlaces de microondas, e sim pelo sinal do ar captado de algum canal vizinho, sendo que este sinal muitas vezes sofre problemas de propagação, não sendo indicado para retransmissão. A área da rede que está sob a responsabilidade da geradora principal, é alimentada com enlaces de microondas, obtendo assim um sinal muito mais confiável para retransmissão. Devido às precárias condições de manutenção dos postos retransmissores das prefeituras, a qualidade da rede fica prejudicada nestas regiões.

Para o início do planejamento, um esboço (Figura 5.1) mostrando a região de interesse, baseada no planejamento analógico existente, será utilizado. Os círculos representam postos de retransmissão de sinal, o quadrado representa a geradora principal e o triângulo representa uma repetidora de enlace de microondas sem transmissão de um canal de radiodifusão. A área de aproximadamente 9000 km<sup>2</sup> se expande principalmente na direção norte, noroeste e nordeste do estado de São Paulo.



## 5.2 Planejamento da Rede de Retransmissão Digital

Duas estratégias são possíveis no início de projeto:

- A primeira é considerar de imediato todas as limitações impostas pelo plano analógico em termos de interferência, e trabalhar com os nulos propostos no plano PBTVD, situação necessária para o planejamento MFN.
- A segunda estratégia é desconsiderar o legado analógico, proceder ao projeto digital com todas as suas potencialidades, maximizando sua performance, e em caso de acontecerem interferências com o analógico, tratá-las pontualmente.

Este trabalho adotará a segunda estratégia, visto que a rede analógica terá um fim previsto, e certamente as correções necessárias na rede digital inteira, após o desligamento da rede analógica, serão muito mais trabalhosas e onerosas do que se proceder a ajustes pontuais na rede.

A geradora principal de Campinas e casos que assim o exigirem usarão uma antena diretiva, sendo que a geradora de Campinas, por exemplo, usará uma antena diretiva voltada para o interior para não transmitir na direção de São Paulo, e em todos os outros postos, sempre que possível, a escolha será por antenas onidirecionais.

A área pode ser dividida em ramos, sendo escolhidos os ramos Oeste, com Santa Bárbara d'Oeste, Piracicaba, São Pedro e Capivari, Norte com Limeira, Araras e Mogi Guaçu, Leste com Amparo e Águas de Lindóia e Sul com Valinhos, Vinhedo, Louveira e Indaiatuba.

Iniciando a simulação da rede pela geradora principal tem-se que um dos canais propostos no PBTVD para a cidade de Campinas é o canal 13 D VHF, co-localizado com o canal 12 A VHF, operando na classe A5 conforme [20], sendo a potência do canal analógico 10 kW e do canal digital 0,502 kW, e (CBT+HCF) igual a 860 m.

É importante ressaltar novamente que este planejamento digital foi baseado na premissa de que, para se obter a mesma cobertura da rede analógica, a potência do transmissor digital deve estar 13 dB abaixo da potência do transmissor analógica. Utilizando o software de Análise de Interferência versão demo do CPqD, tem-se a área de cobertura do contorno protegido para a cidade de Campinas, canal digital 13 VHF, mostrada na Figura 5.2.

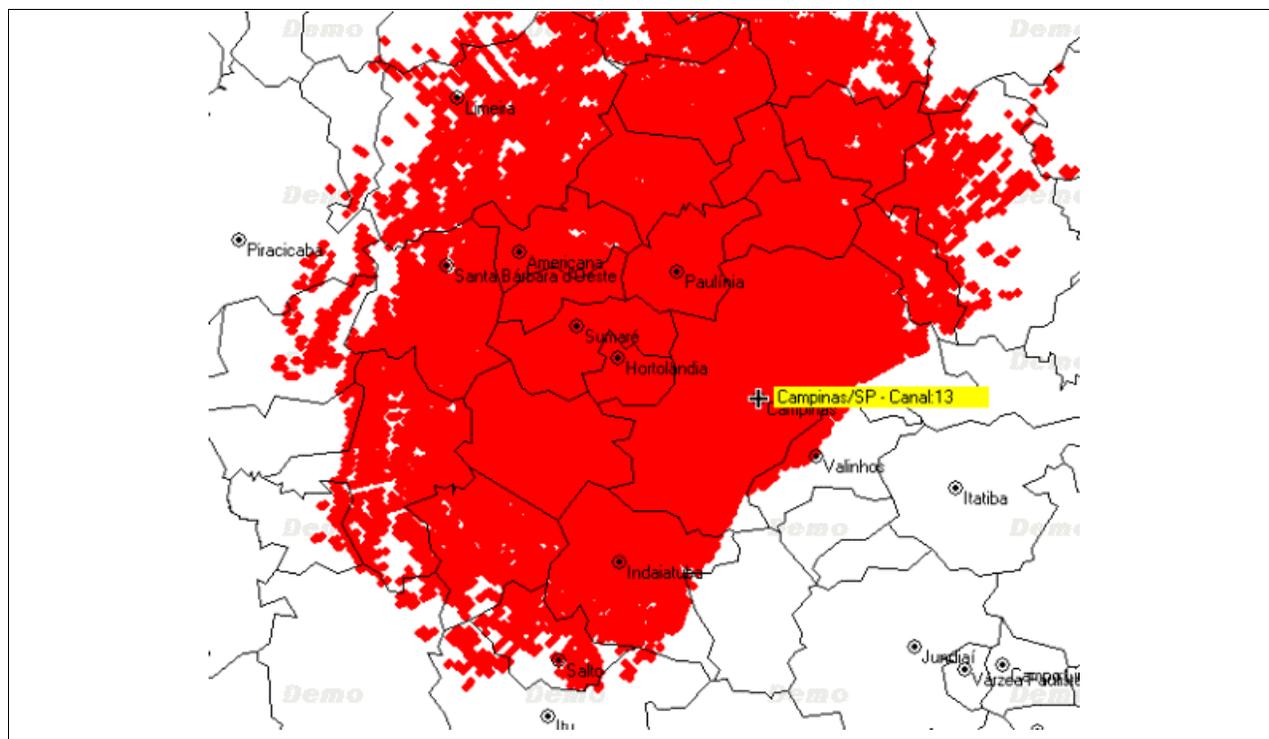


Figura 5.2- Área de Cobertura da Geradora Principal Potência 502 W ERP (Digital)

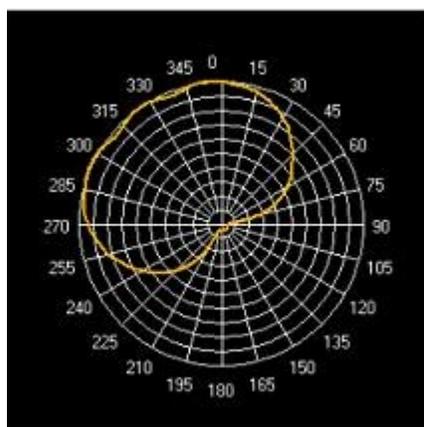


Figura 5.3- Diagrama de Irradiação da Antena de Transmissão da Geradora Principal

Os dados de simulação foram: Diagrama da antena, direcional com orientação a 315°, mostrada na Figura 5.3, para não transmitir sinal na direção de São Paulo, ERP 502 W, cota da base da torre mais altura do centro de fase da antena, (CBT+HCF), igual a 860 m. Note-se que foi utilizada a potência

máxima permitida pelo plano de 502 W ERP. Conforme a simulação foi se desenvolvendo, os resultados indicaram se esta potência atendeu ou não ao funcionamento da rede.

O programa fornece emissoras potencialmente interferentes num raio de busca de até 100 km, por exemplo, Piracicaba canal 13 A, São Paulo canal 13(-) A, Monte Sião canal 13 A, Rio Claro canal 13 A e Jundiaí canal 12 D. Isto porque se supõe que o planejamento será em MFN, sendo SFN só teria sentido os canais interferentes adjacente superior e inferior. O plano fornece as relações de proteção que devem ser obedecidas como visto no Capítulo 3. Porém, é importante observar que para o planejamento no sistema SFN, a alocação de um canal digital de mesmo número, dentro da região da rede SFN para outra executante do serviço, não deve acontecer. Em contrapartida, quando o sistema for completamente digital, todas as interferências co-canais seriam controladas dentro da própria rede de um único executante do serviço, retirando-se esta tarefa do órgão fiscalizador ANATEL, sendo que este arbitraria somente questões relacionadas às interferências canal adjacente superior e inferior. Da Figura 5.2, observa-se que a cobertura digital está bem próxima da cobertura analógica, o que satisfaz a condição de replicação.

O próximo posto a ser simulado é o posto retransmissor de Piracicaba, devido à sua importância comercial. O posto está distante 65 km de Campinas e também será no canal VHF 13 D, sendo sua potência ERP indicada pelo plano de 80 W e (CBT+HCF) igual a 651 m. Para todos os postos retransmissores da rede SFN, será adotado inicialmente 80 W de potência ERP indicada no plano. Um gráfico de intensidade de campo na radial que liga Campinas a Piracicaba é mostrado na Figura 5.4 Este gráfico mostra o comportamento do sinal conforme [19], e pode-se observar que o sinal sofre grandes variações a partir de 23 km de distância.

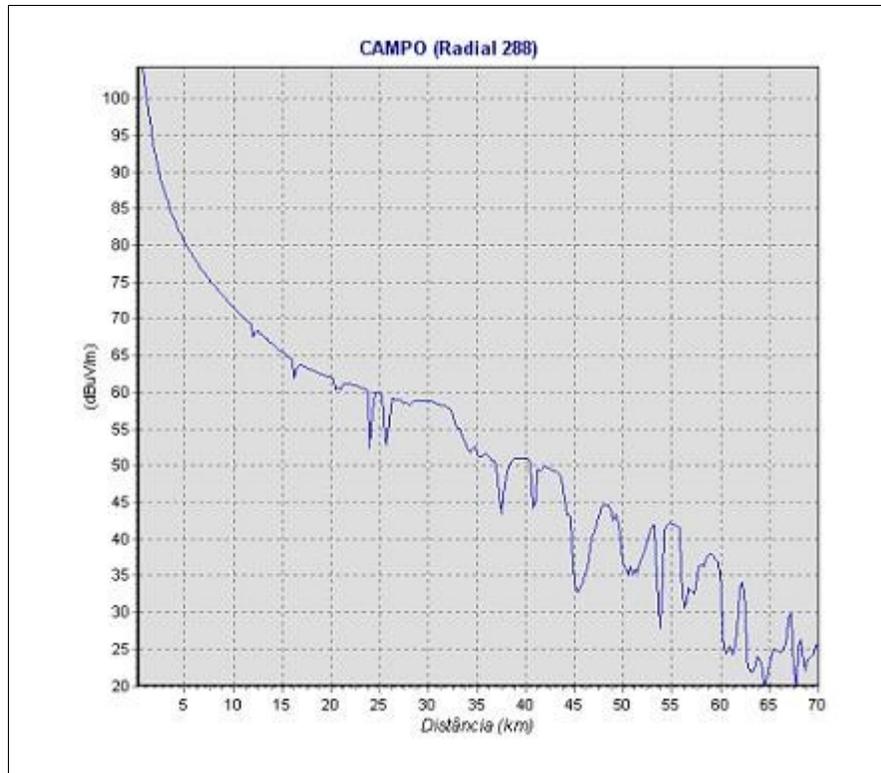


Figura 5.4 Simulação da Intensidade de Campo na Radial Campinas-Piracicaba Distância 65 km

Ainda da Figura 5.4 observa-se que o sinal em Piracicaba seria igual ou menor que 20 dBµV/m, ou seja para efeitos práticos a cidade de Piracicaba não está coberta com sinal suficiente para execução do serviço. Conforme [20] a intensidade mínima para um sinal COFDM FEC 3/4 seria de 37 dBµV/m, e para o contorno protegido, seriam necessários de acordo com as curvas E (50,90), 40 dBµV/m. A Figura 5.5 mostra o perfil do terreno da radial entre Campinas e Piracicaba utilizando o software Radio Mobile 6.4.

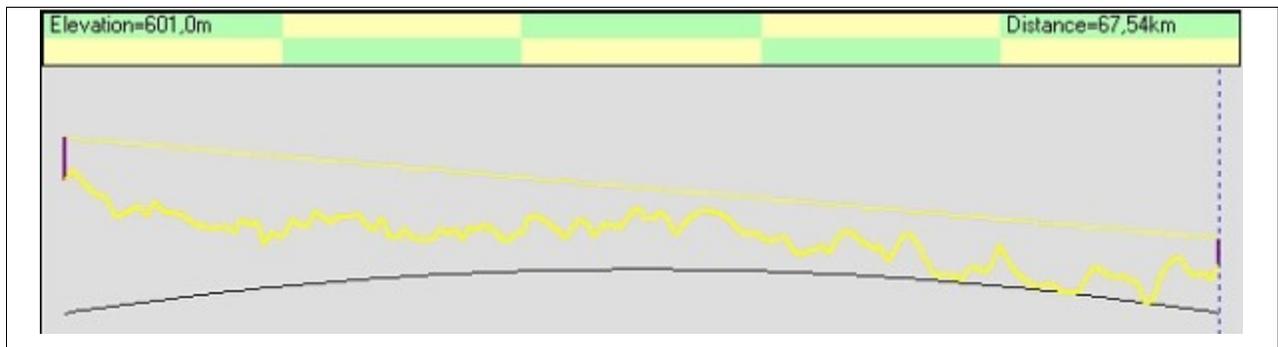


Figura 5.5 Perfil do Terreno na Radial Campinas-Piracicaba

A Figura 5.6 mostra a área de cobertura de Piracicaba e as cidades vizinhas a serem cobertas.

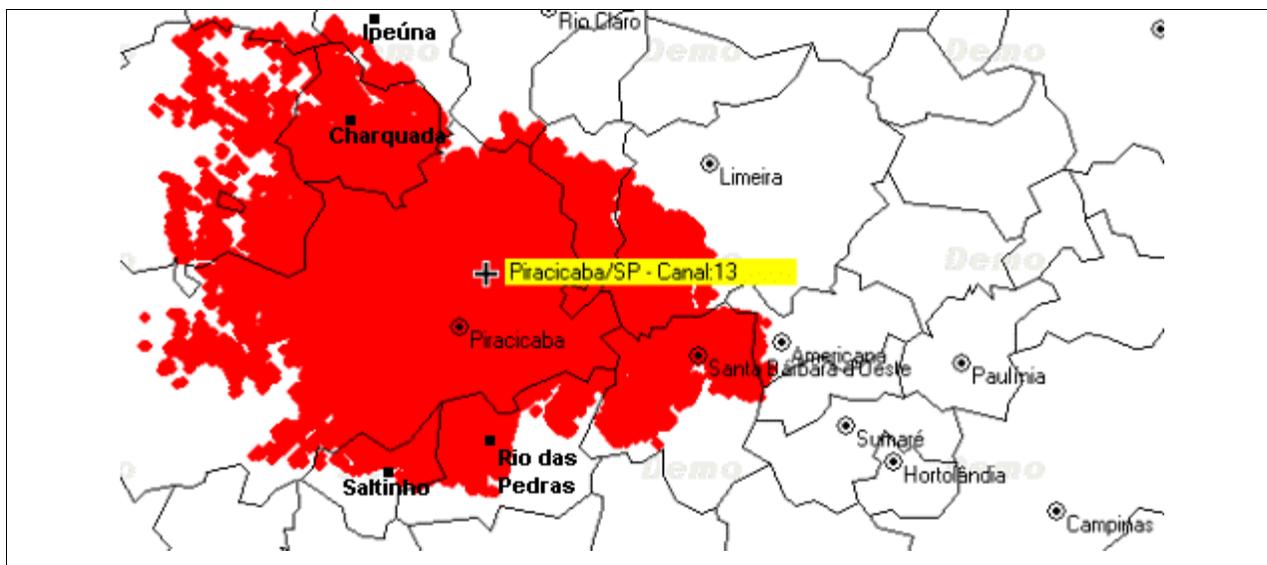


Figura 5.6 Área de Cobertura do Contorno Protegido de Piracicaba Potência 80 W ERP

Consultando a Tabela 5.1, este transmissor deve cobrir Ipeúna, Charqueada, Rio das Pedras e Saltinho. Observa-se que Ipeúna, e Saltinho sofrem deficiência de sinal. Para resolver este problema, poder-se-ia adotar a solução do sistema MFN, que seria aumentar a altura da torre e aumentar a potência ERP. Para se manter a fidelidade ao plano PBTVD, não se deve aumentar a potência ERP e aumentar a altura da torre pode ser economicamente inviável.

A vantagem da rede SFN, sobre a rede MFN, de poder trabalhar com potências menores em um conjunto maior de transmissores, diversidade espacial, implica em um melhor controle da rede em áreas de fronteira.

Com sinal proveniente de outros postos retransmissores, melhora-se a cobertura destas áreas. Neste caso, Ipeúna receberia contribuição de sinal também do posto retransmissor de São Pedro, e Saltinho e Rio das Pedras teriam uma contribuição de Santa Bárbara d'Oeste.

Fazendo na Figura 5.7 um esboço das manchas de cobertura de Piracicaba e Campinas, para visualização da região de fronteira, sabe-se que a distância entre Campinas e Piracicaba supera 38 km, logo o sinal proveniente de Campinas após esta distância é considerado como sinal interferente.

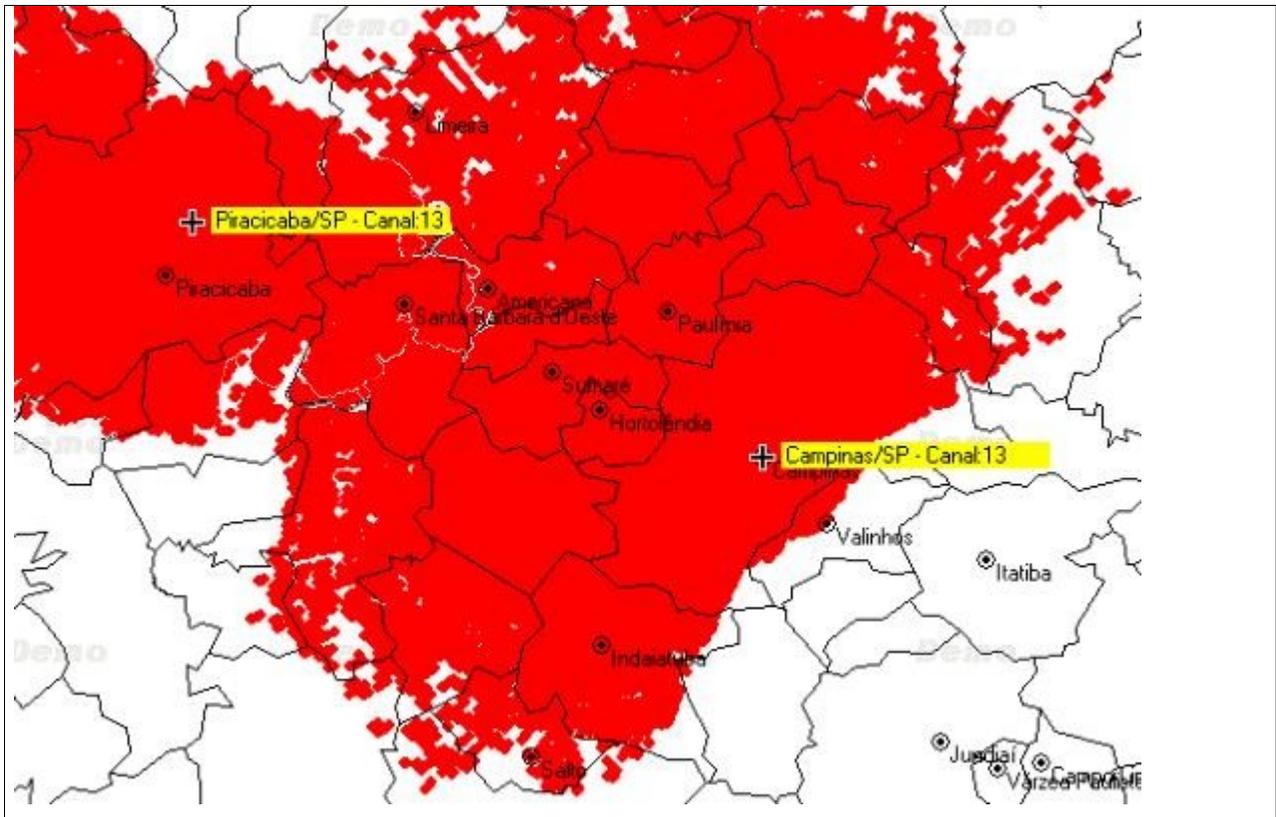


Figura 5.7. Esboço do Detalhe da Região de Borda entre Campinas 502 W ERP e Piracicaba 80W ERP

### 5.3 Análise da Região de Fronteira

As regiões de fronteira são particularmente importantes para o projeto de uma rede SFN, porque é nestas regiões que se apresentam os vários sinais chegando, e saber como eles irão contribuir ou interferir, é a questão chave a ser determinada.

Tomando três pontos comuns A, B e C de amostra na região de fronteira, observa-se a intensidade de campo do sinal proveniente de Campinas e posteriormente do sinal proveniente de Piracicaba. Na Figura 5.8 são esboçados os pontos escolhidos para análise da região de fronteira. Nesta análise, serão considerados as distâncias e os atrasos dos seis sinais que chegam aos pontos provenientes de Campinas e Piracicaba.

Nas Tabelas 5.2 e 5.3 foram transcritos a distância, atraso e intensidade de campo dos pontos escolhidos.

Tabela 5.2 Distâncias aos Pontos A, B e C

	Distância de Campinas	Distância de Piracicaba
Ponto A	49 km	16 km
Ponto B	47 km	17 km
Ponto C	49 km	18 km

Tabela 5.3 Atrasos e Intensidade de Campo

	Ponto A		Ponto B		Ponto C	
	Atraso	Intensidade de Campo	Atraso	Intensidade de Campo	Atraso	Intensidade de Campo
Sinal vindo de Campinas	163 $\mu$ s	38 dB $\mu$ V/m	156 $\mu$ s	40 dB $\mu$ V/m	163 $\mu$ s	35 dB $\mu$ V/m
Sinal vindo de Piracicaba	53 $\mu$ s	51 dB $\mu$ V/m	56 $\mu$ s	51 dB $\mu$ V/m	60 $\mu$ s	37 dB $\mu$ V/m

Observa-se que a situação dos atrasos e intensidade de campo envolvidos nesta situação seria de difícil manipulação pelo receptor. O sinal proveniente de Campinas está além do intervalo de guarda e apresenta em determinados pontos (Ponto C), intensidade quase igual ao sinal de Piracicaba que chega primeiro. Como visto no Capítulo 4, o receptor pode tratar a situação de várias maneiras, a fim de otimizar a recepção. Em termos de rede, esta situação seria comum se o sistema fosse em MFN, ou seja, os receptores da região de fronteira teriam dois sinais disponíveis com a mesma programação ao custo de dois canais diferentes. No sistema SFN se os sinais estivessem sincronizados, a situação seria difícil para o receptor, e em operação assíncrona a recepção seria ainda mais difícil visto que se trataria de uma forte interferência co-canal.

Admite-se, como exemplo, o radiodifusor trabalhando com HDTV em um único segmento com taxa de código 5/6, intervalo de guarda 1/8, modo 8k e modulação 64QAM, no padrão ISDB sendo então a duração do intervalo de guarda de 126 $\mu$ s. Os parâmetros da modulação COFDM para o ISDB são mostrados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 Duração de Símbolos para o ISDB modo Terrestre

Largura de Banda	6 MHz							
Parâmetro	Modo 4 K				Modo 8 K			
Intervalo de Guarda 1/Tu	1/4	1/8	1/16	1/32	1/4	1/8	1/16	1/32
Duração (Tu) ( $\mu$ s)	504				1008			
Intervalo de Guarda ( $\mu$ s)	126	63	31,5	15,75	252	126	63	31,5
Duração do Símbolo(Ts) ( $\mu$ s)	630	567	535,5	519,75	126	1134	1071	1039,5

Observa-se na área onde estão localizados os pontos, em especial o ponto C, que existem regiões com deficiência de sinal, sendo esta região caracterizada como de difícil recepção por causa da excessiva variação que o sinal sofre devido às condições de propagação.

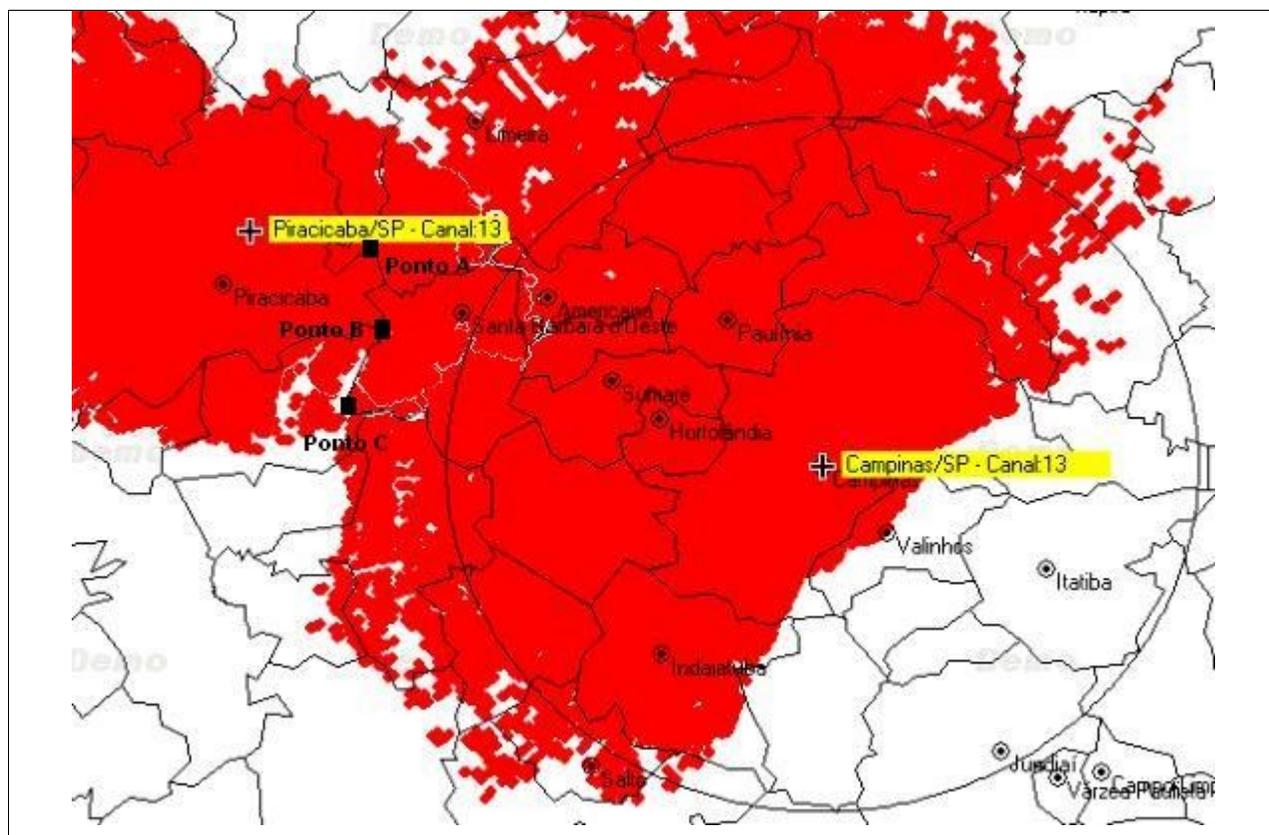


Figura 5.8 Pontos para Avaliação do Sinal na Fronteira dos Contornos Protegidos  
Campinas 502 W ERP e Piracicaba 80 W ERP

De acordo com estes resultados, o sinal proveniente de Campinas chega com um atraso maior que a duração do intervalo de guarda e a região apresenta pontos onde o sinal está abaixo do limiar de recepção, sinal menor que  $20 \text{ dB}\mu\text{V/m}$ , alternando com sinais da ordem de  $40 \text{ dB}\mu\text{V/m}$ .

Para resolver o problema, adotou-se a seguinte estratégia; diminuiu-se a potência da geradora principal para  $100 \text{ W ERP}$ , com o objetivo de se diminuir a intensidade do sinal na região de fronteira, e ativou-se em Santa Bárbara d'Oeste uma retransmissora com potência ERP de  $80 \text{ W}$  em uma torre de  $50 \text{ m}$  de altura já existente da rede analógica. As Figuras 5.9 e 5.10 comparam visualmente a diminuição da área de cobertura da geradora principal protegido na região de fronteira de  $38 \text{ km}$ .

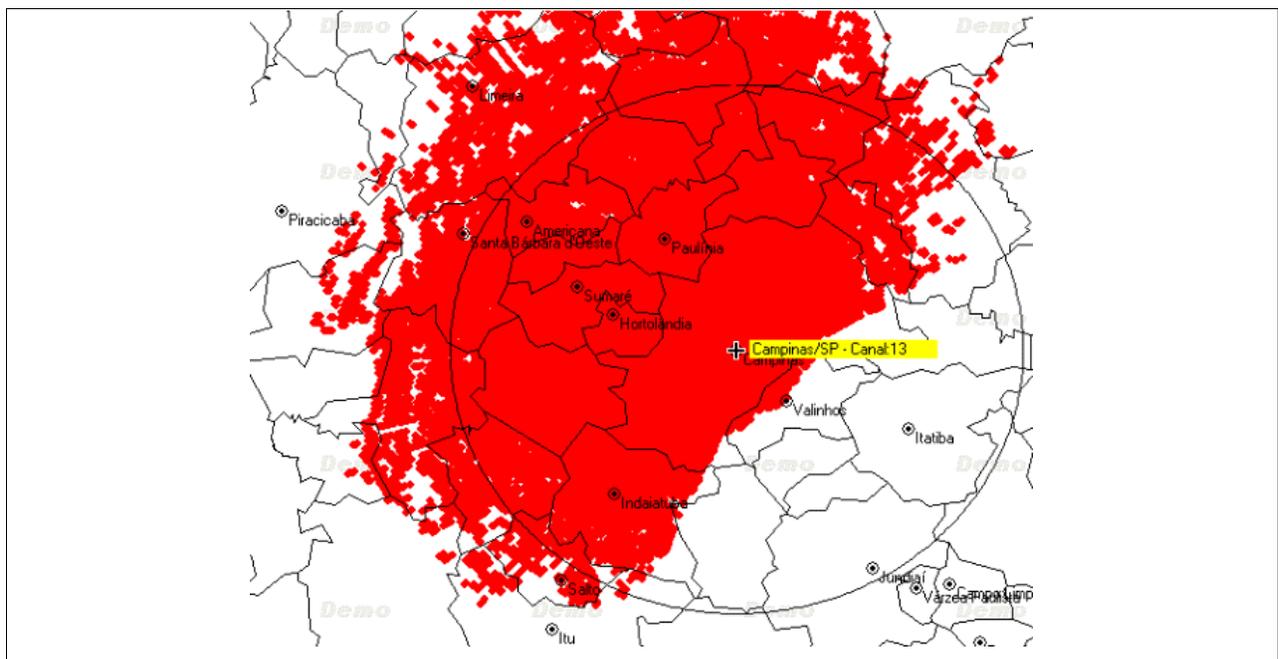


Figura 5.9 Campinas 502 W ERP e Piracicaba 80 W ERP

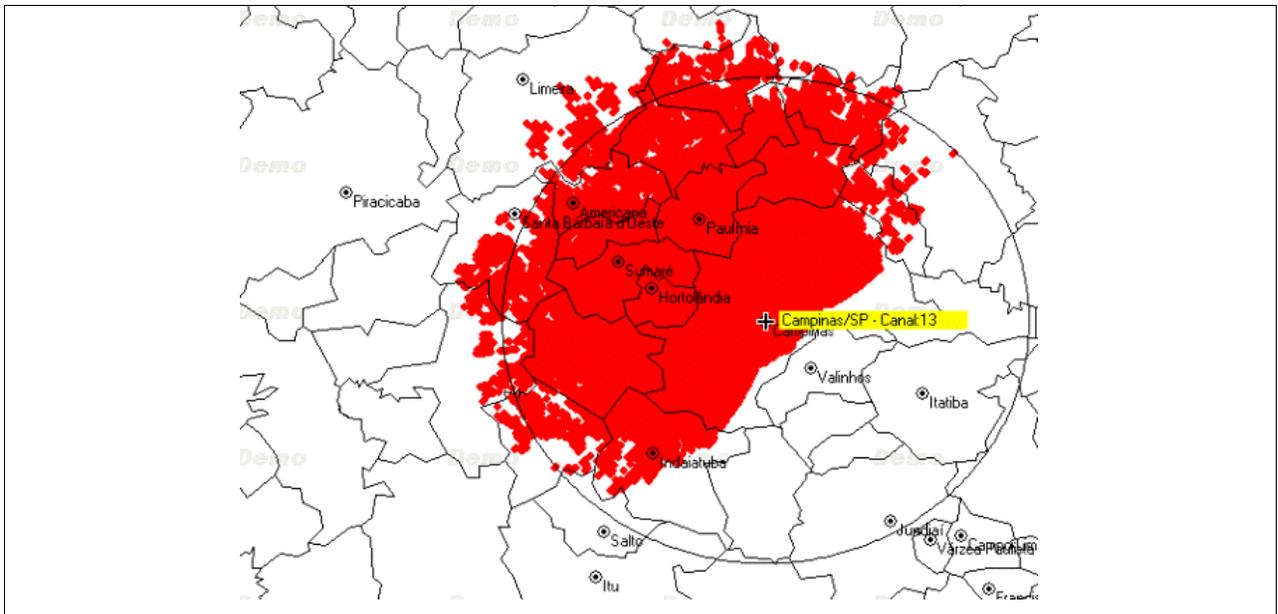


Figura 5.10 Geradora Principal com 100 W de Potência ERP

Na Figura 5.11 é mostrada a área de cobertura da cidade de Santa Bárbara d'Oeste

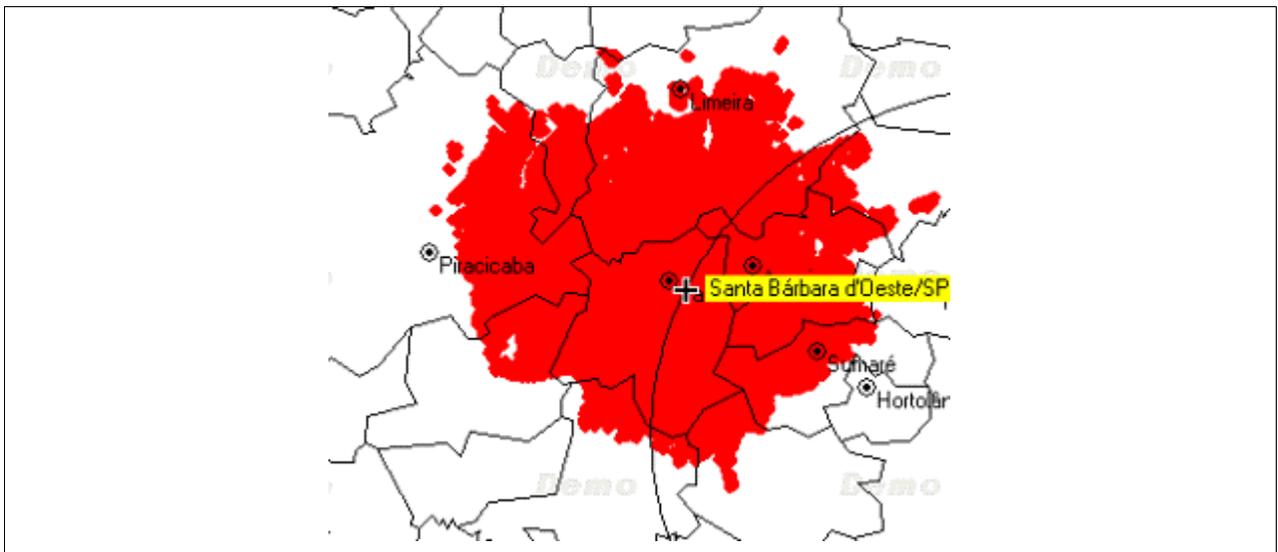


Figura 5.11 Área de Cobertura do Posto Retransmissor de Santa Bárbara d'Oeste

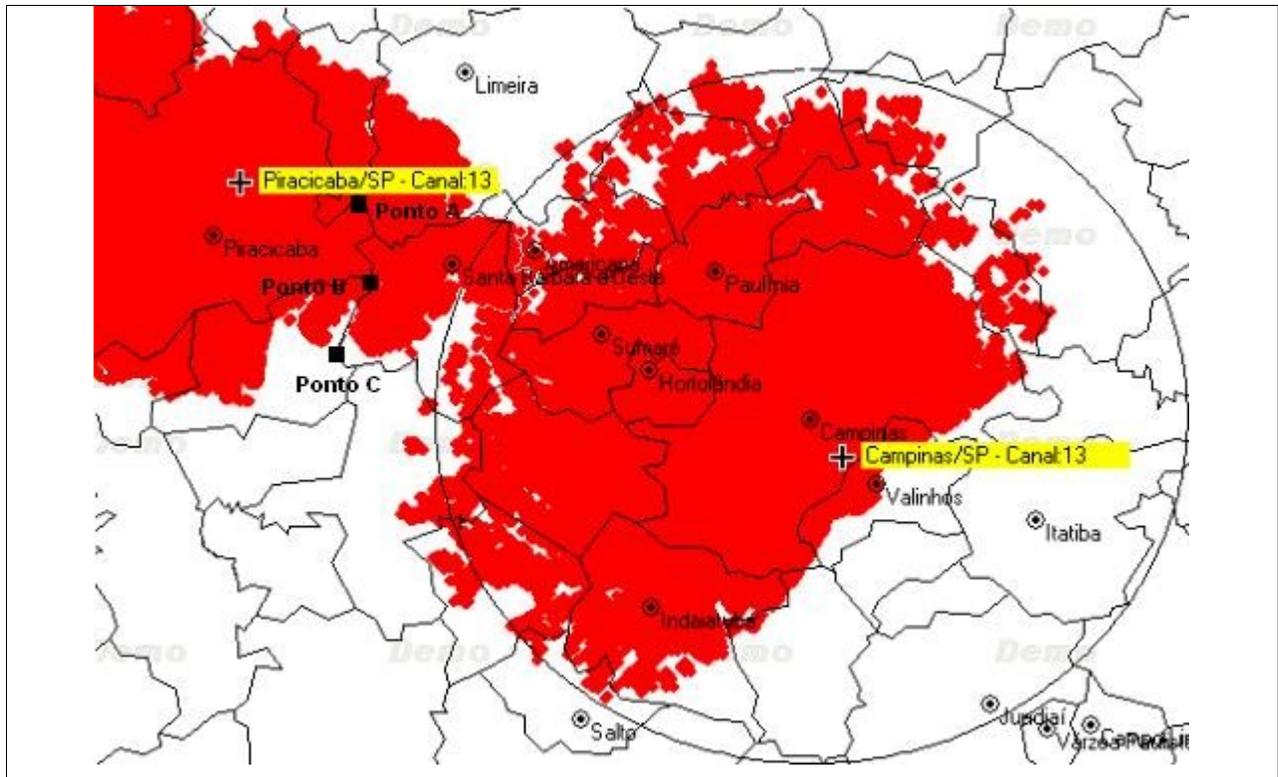


Figura 5.12 Situação de Piracicaba 80 W ERP e a Geradora Principal com 100 W ERP

Trabalhando-se com os parâmetros do ISDB-T, um único segmento com taxa de código 5/6, intervalo de guarda 1/8, modo 8 k e modulação 64 QAM, com intervalo de guarda de 126 $\mu$ s, pode-se marcar um círculo de 38 km de raio e estabelecer uma relação de sinal-útil / sinal-interferente, dependendo da posição do receptor dentro e fora do círculo e do transmissor em questão. Este círculo é mostrado nas Figuras 5.10 e 5.12 para o transmissor de Campinas. A nova situação pode ser vista na Figura 5.13, onde na antiga região de fronteira já não se observam as falhas na área de cobertura com a ativação do posto retransmissor de Piracicaba. Na Figura 5.11, é mostrada somente a área de cobertura de Santa Bárbara d'Oeste.

Nesta região em particular, a distribuição de sinal passou a ser mais uniforme, conforme se observam os resultados da Tabela 5.5.

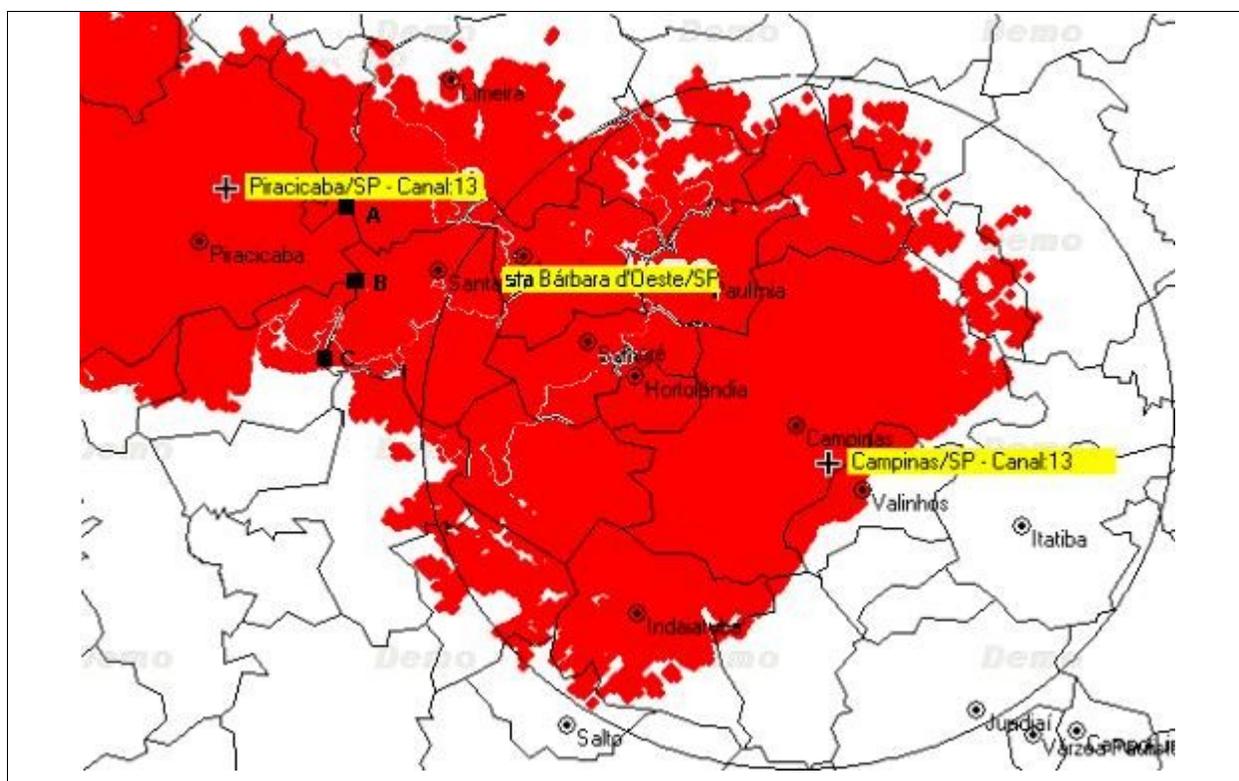


Figura 5.13 Nova Área de Cobertura da Rede

A Tabela 5.5 fornece os novos valores de intensidade de campo do sinal nos pontos A, B e C, incluindo Santa Bárbara d'Oeste.

Tabela 5.5 Novos Valores de Intensidade de Campo nos Pontos A, B e C

	Dist. de SBO ao ponto	Intensidade de Campo( $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ ) de	Intensidade de Campo( $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ ) de	Intensidade de Campo( $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ ) de
		Piracicaba	SBO	Campinas
Ponto A	15	51	52	24
Ponto B	10	51	55	21
Ponto C	16	37	44	17

A diminuição da potência da geradora minimizou os sinais provenientes de Campinas que excediam o intervalo de guarda, e a contribuição de Santa Bárbara d'Oeste deixou o sinal mais uniforme na região de fronteira. Porém, as cidades de Artur Nogueira e Santo Antônio da Posse, tiveram uma diminuição de

sinal recebido da geradora devido à diminuição de potência, logo estas cidades deverão receber contribuição de sinal de outros postos retransmissores.

Outra vantagem de se deixar o sinal mais uniforme nesta região é que nesta área se encontra a rodovia de ligação rodoviária com Piracicaba, logo no trajeto Campinas, Santa Bárbara'Oeste, Piracicaba acontecerá a mesma programação no mesmo canal, possibilitando uma eventual recepção móvel de canal (HDTV).

## 5.4 Expandindo a Rede

O próximo ponto a ser simulado é o posto retransmissor de São Pedro. Este retransmissor deverá contribuir com sinal para Charqueada e Ipeúna, além de contribuir com sinal para Piracicaba na área rural. Os parâmetros de simulação foram potência ERP 0,02 kW, CBT+HCF 867 m e antena onidirecional.

A Figura 5.14 mostra a situação com o posto de São Pedro cobrindo as cidades de Charqueada e Ipeúna.

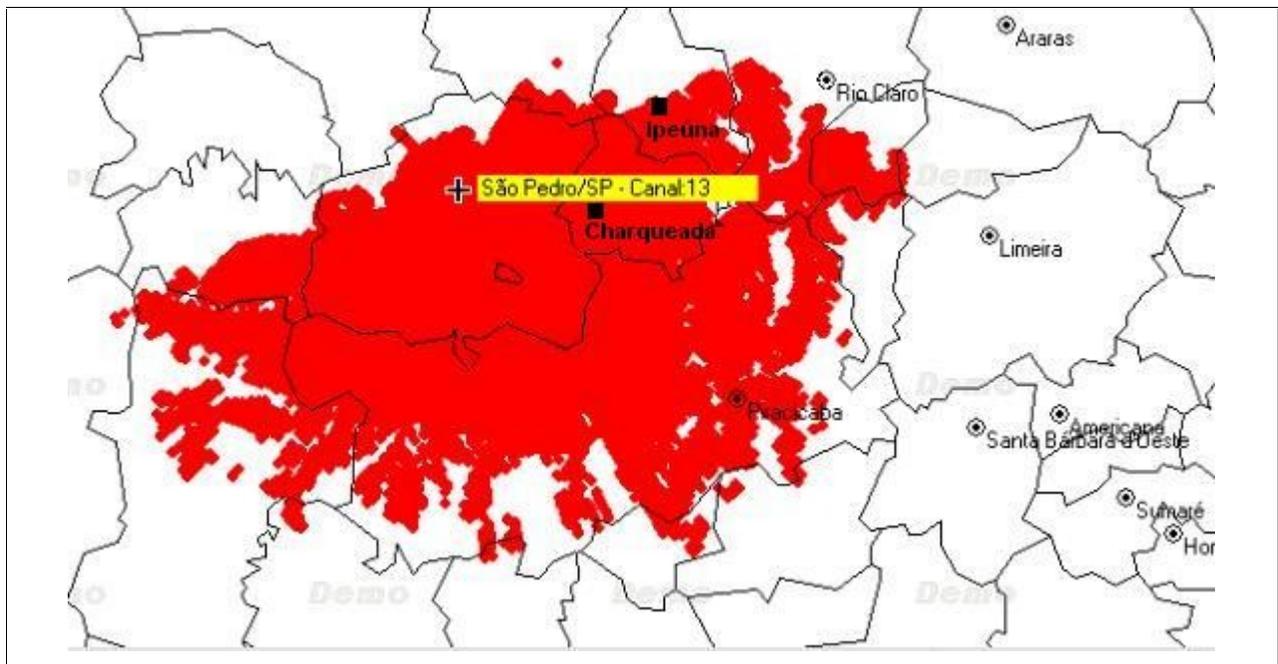


Figura 5.14 Situação com os Postos de São Pedro e Piracicaba Cobrindo as Cidades de Charqueada e Ipeúna.

A Tabela 5.6 mostra a situação com os postos de São Pedro e Piracicaba cobrindo as cidades de Charqueada e Ipeúna.

Tabela 5.6 Contribuições de São Pedro e Piracicaba

	Sinal vindo de São Pedro			Sinal vindo de Piracicaba		
	Distância (km)	Atraso ( $\mu$ s)	Int.de Campo dB $\mu$ V/m	Distância (km)	Atraso ( $\mu$ s)	Int.de Campo dB $\mu$ V/m
Charqueada	17	57	49	24	80	44
Ipeúna	23	77	30	33	110	40

Observa-se da tabela acima que os sinais provenientes de São Pedro e Piracicaba encontram-se dentro do limite do intervalo de guarda, sendo, portanto, considerados construtivos para o receptor. Assim cidades pequenas como estas, que não constam do PBTVD, podem ser servidas com a TV digital mais rapidamente, porque não há a necessidade de se viabilizar novos canais em um processo demorado junto ao Ministério das Comunicações.

Para fechar o ramo oeste da rede, será ativado o posto retransmissor de Capivari, repetindo-se os parâmetros de simulação potência ERP 0,08 kW, CBT+HCF 598 m, antena onidirecional, vem a Figura 5.15 a seguir.

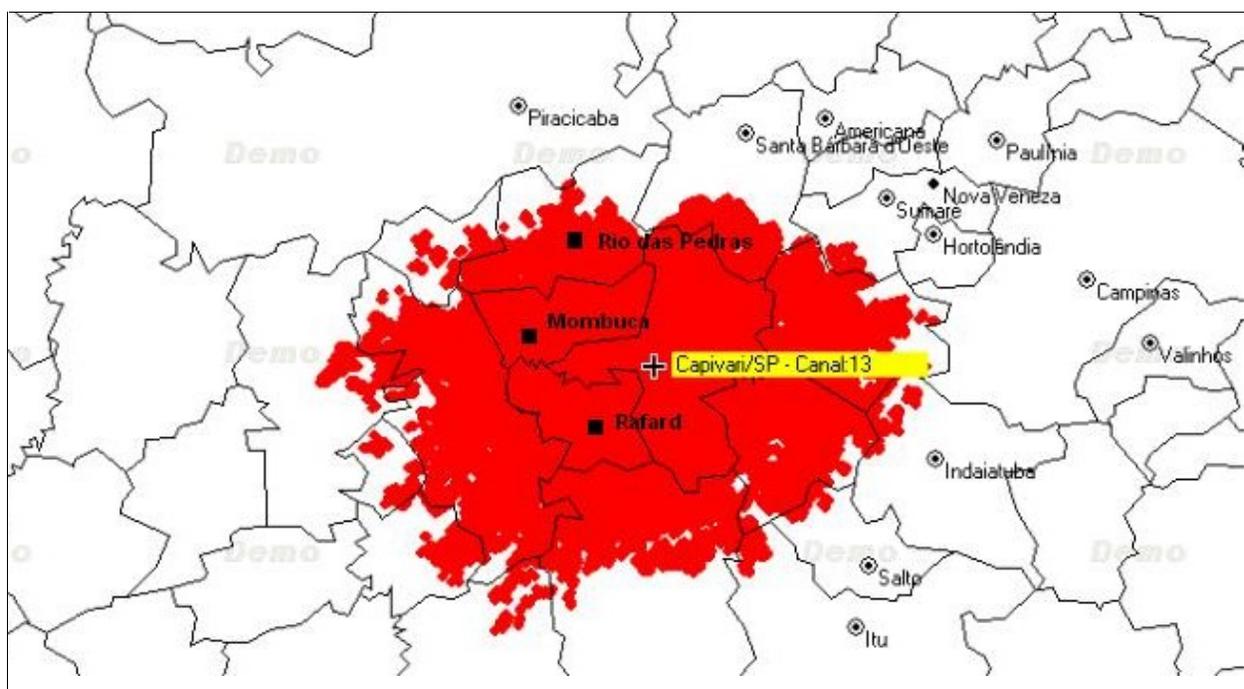


Figura 5.15 Área de Cobertura de Capivari



## 5.5 Expandindo o “Braço” Norte

O “braço” norte da rede é formado pelos postos de Limeira, Araras e Mogi-Guaçu e, conforme a Tabela 5.1, Limeira deve cobrir também as cidades de Cordeirópolis, Engenheiro Coelho e Iracemápolis. A cidade de Araras deve cobrir somente a cidade de Araras, e Mogi-Guaçu cobre Estiva Gerbi e Mogi-Mirim. Conforme a estratégia da rede SFN, Araras contribuirá com sinal para Engenheiro Coelho e Cordeirópolis, sendo que Iracemápolis já tem contribuição de Piracicaba.

Simulando então o primeiro posto retransmissor de Limeira, com os parâmetros potência ERP 0,08 kW, CBT+HCF 695 m, antena onidirecional vem a Figura 5.17.

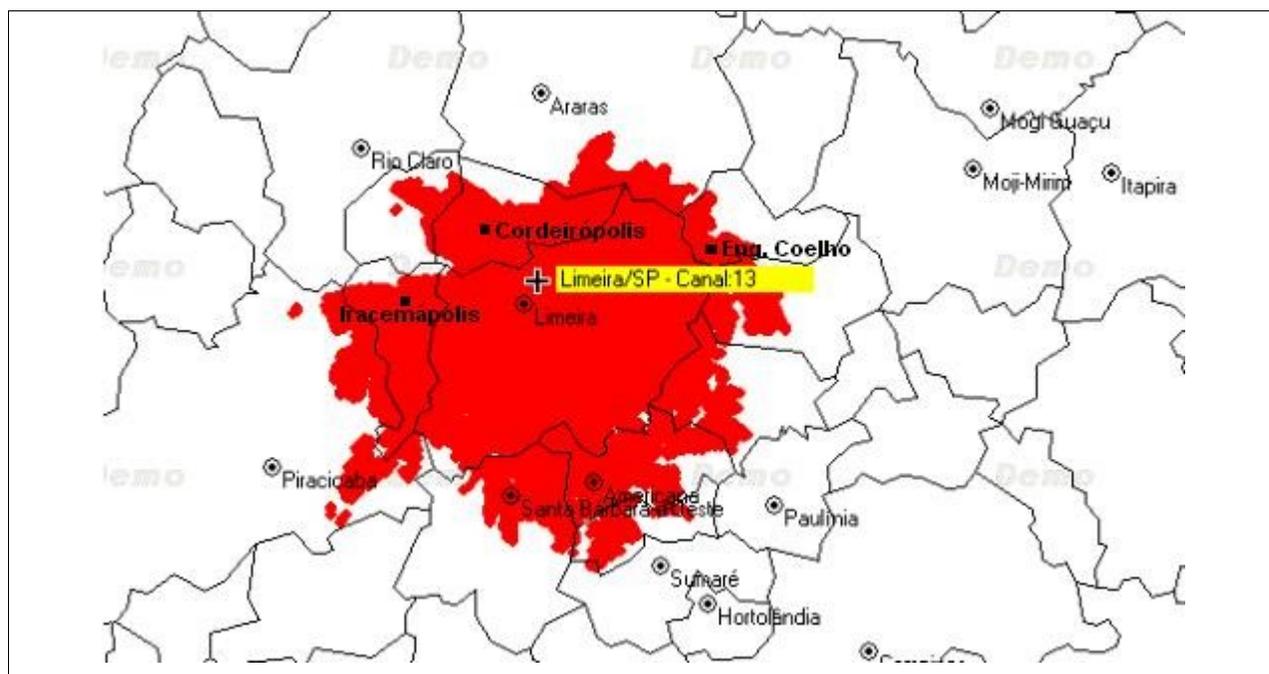


Figura 5.17 Área de Cobertura de Limeira Mostrando Cordeirópolis e Iracemápolis

Observa-se da Figura 5.17 que Cordeirópolis Iracemápolis e Engenheiro Coelho são cobertas com sinal de fronteira sendo sua intensidade de campo e distância descrita na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 Distância e Intensidade de Campo do Sinal Proveniente de Limeira

	Distância de Limeira (km)	Intensidade de campo (dB $\mu$ V/m)
Iracemópolis	10	45
Cordeirópolis	12	52
Engenheiro Coelho	19	42

Outro detalhe a ser observado é que existe sinal de contribuição em Santa Bárbara d'Oeste e Americana, sendo que a distância entre Limeira e Santa Bárbara d'Oeste é de 21 km, e entre Limeira e Americana é de 20 km.

Simulando o posto retransmissor de Araras com os parâmetros de potência ERP 0,08 kW, CBT+HCF 810 m, antena onidirecional vem a Figura 5.18.

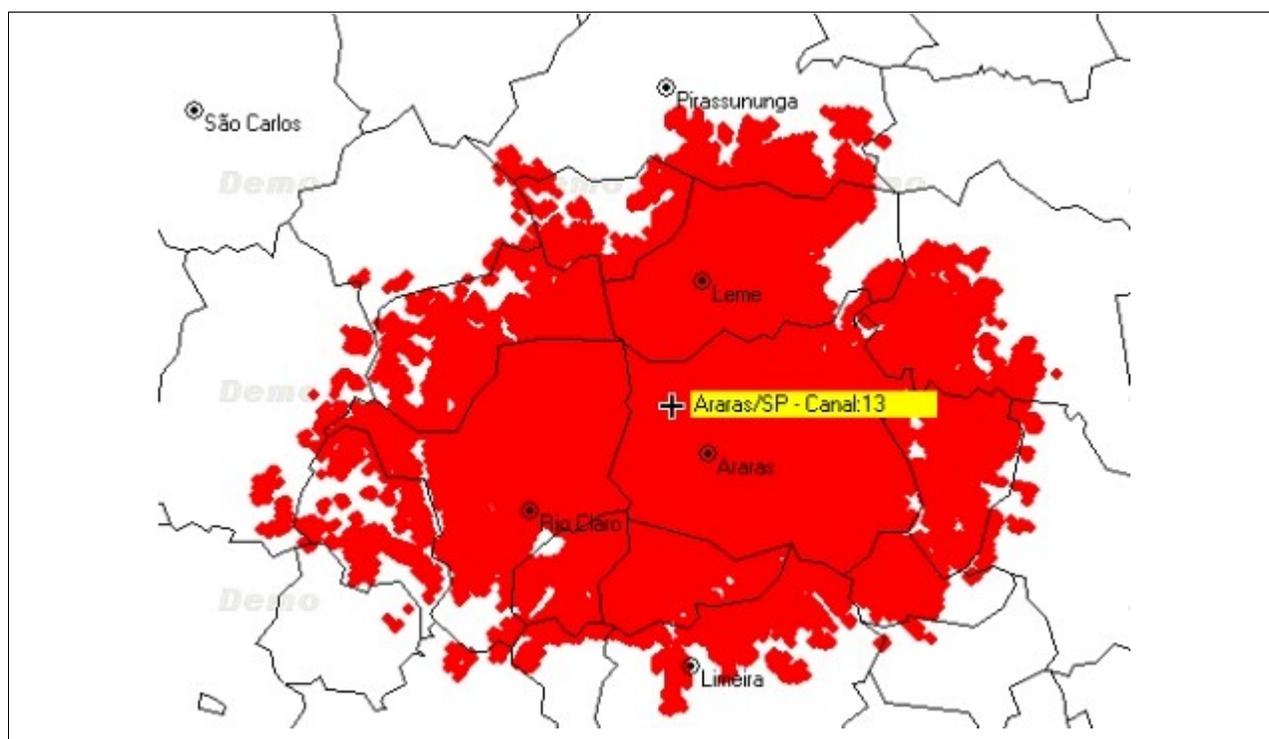


Figura 5.18 Área de Cobertura de Araras

Verifica-se pela Figura 5.18 que as cidades de Leme e Rio Claro estão cobertas pelo sinal da retransmissora, porém estas cidades não pertencem à rede, logo, para evitar que o sinal chegue a estas

idades, usou-se antena diretiva e potência ERP de 0,025 kW, como no diagrama mostrado na Figura 5.19. O resultado é mostrado na Figura 5.20.

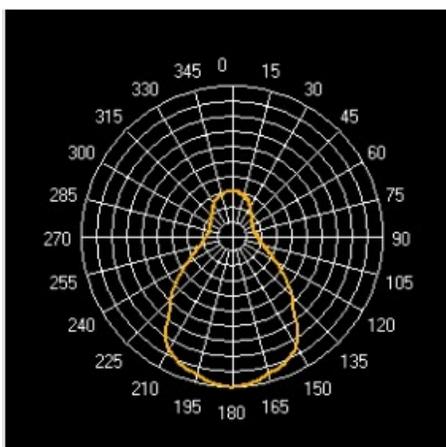


Figura 5.19 Diagrama de Antena Diretiva Utilizada em Araras com Orientação a 180°

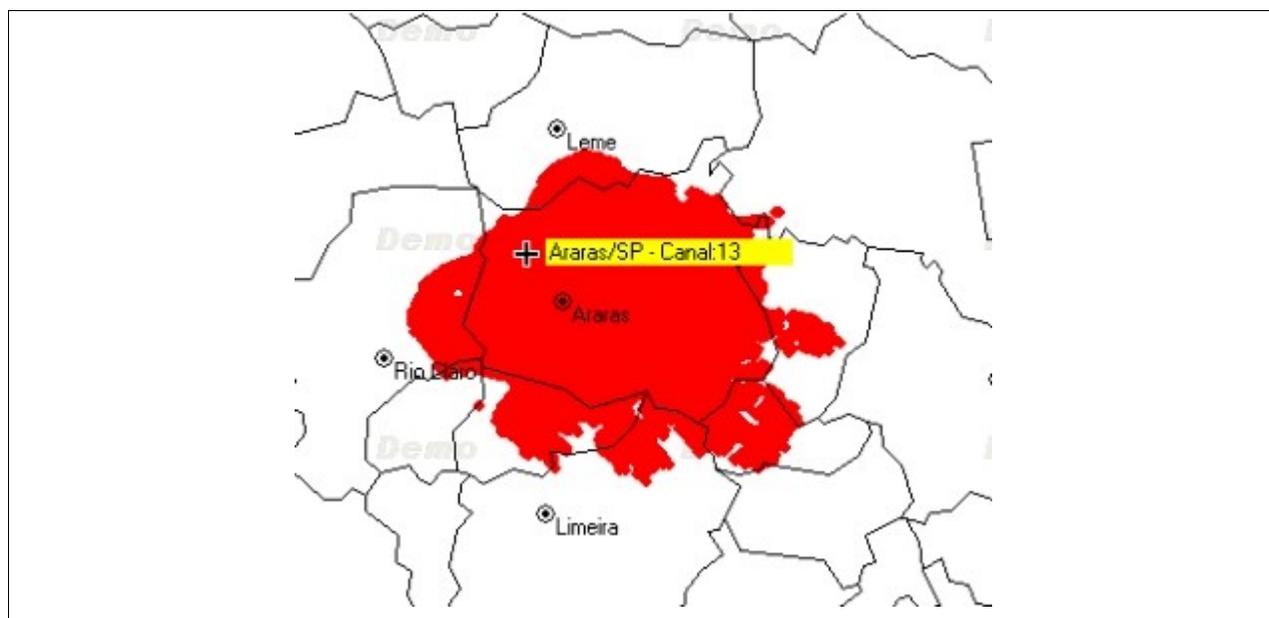


Figura 5.20 Área de Cobertura de Araras com 25 W ERP e Antena Diretiva

Ativando-se agora o posto de Limeira com os parâmetros de potência ERP 0,08 kW, CBT+HCF 696 m, antena onidirecional. Sendo a distância entre Araras e Limeira de 25 km. A Figura 5.21 mostra a área

de cobertura de Limeira. Observa-se que Cordeirópolis está coberta com contribuição de sinal de Limeira e Araras.

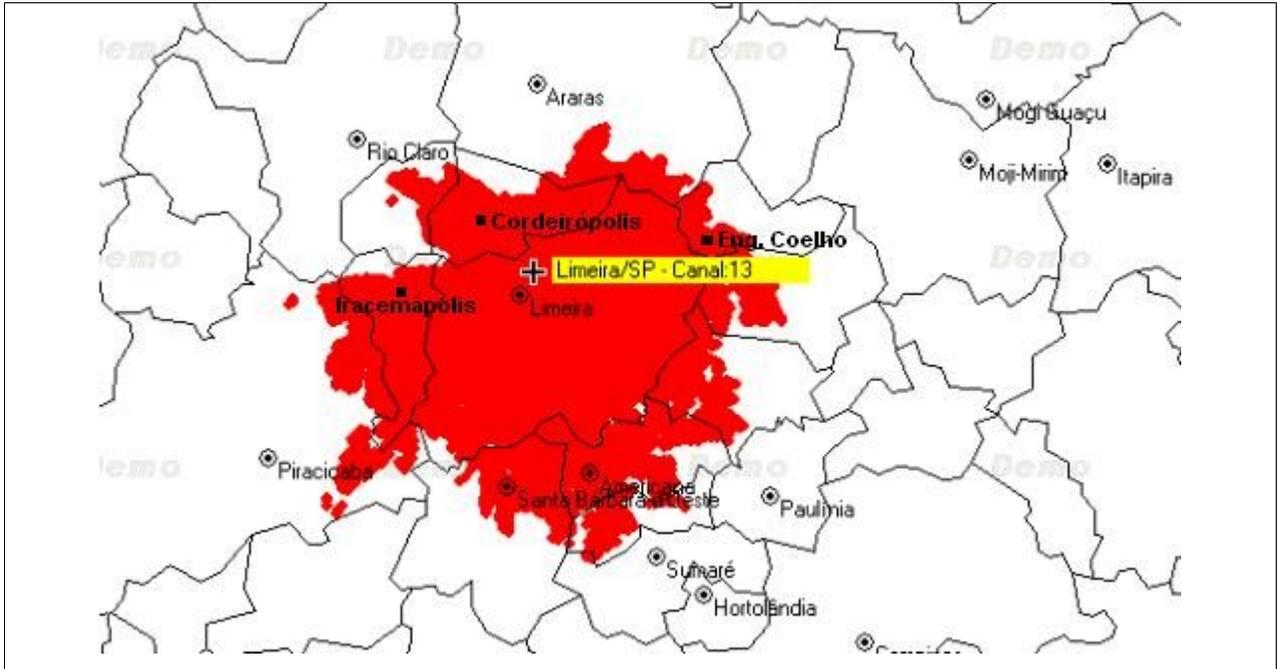


Figura 5.21 Área de Cobertura de Limeira

A área total coberta pode ser vista na Figura 5.22 especificando-se as cidades de interesse.

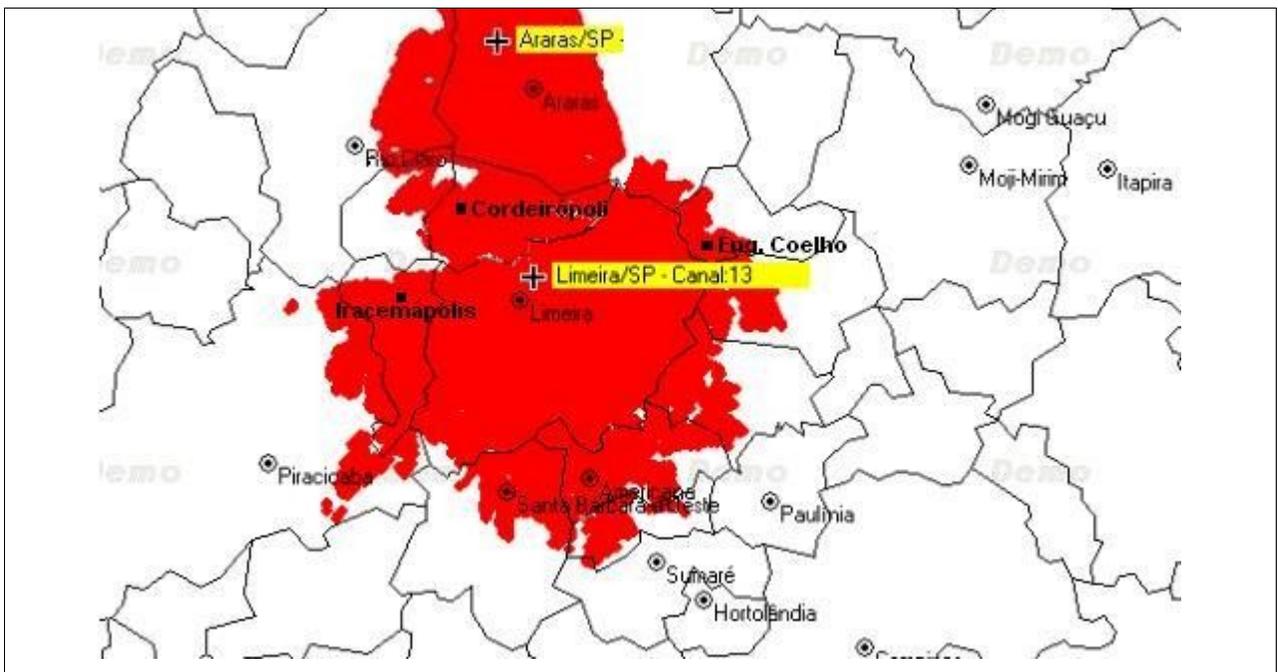


Figura 5.22 Área de Cobertura de Limeira, Araras e Cordeirópolis

Ativando-se o posto de Mogi-Guaçu com os parâmetros potência ERP 80 W CBT+HCF 731 m, e antena onidirecional, vem a Figura 5.23.

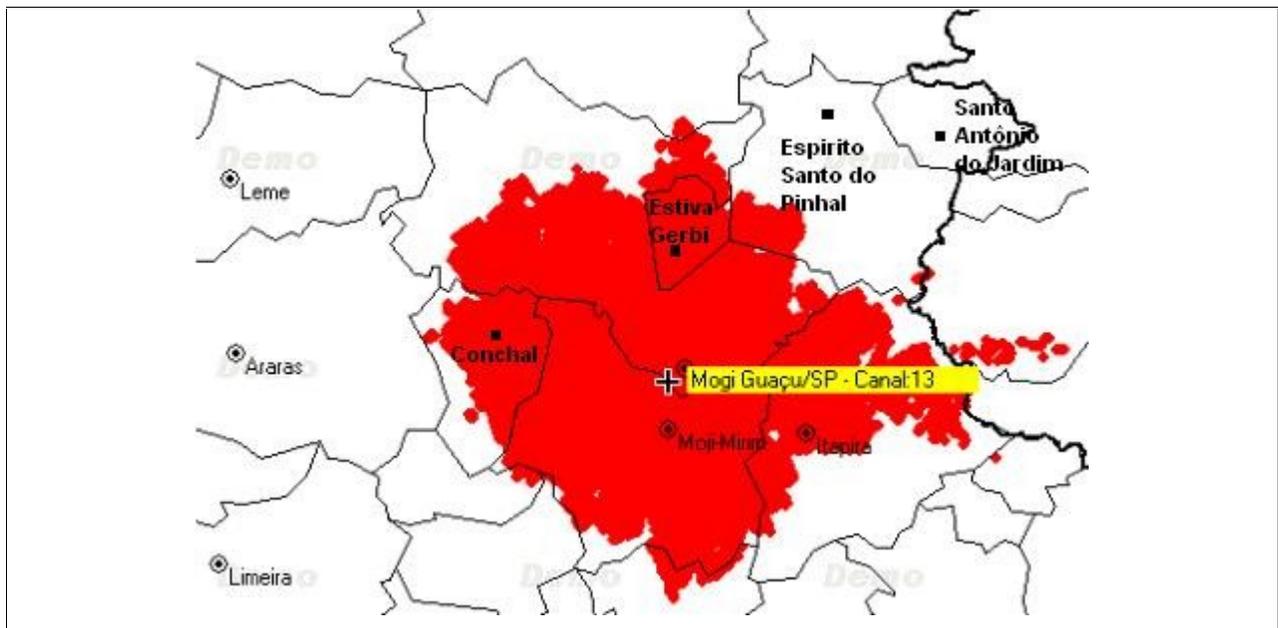


Figura 5.23 Posto de Mogi-Guaçu 80 W ERP

O visual entre Limeira e Mogi-Guaçu é obstruído, conforme mostra a Figura 5.24. Entre Araras e Mogi-Guaçu a radial é desobstruída, porém o sinal em Mogi-Guaçu está abaixo de 20 dB $\mu$ V/m, devido aos parâmetros utilizados para retransmissão.

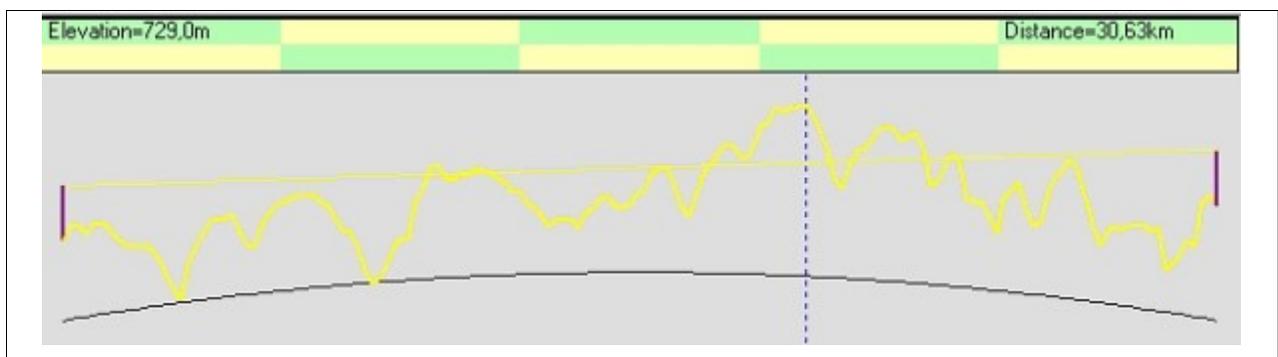


Figura 5.24 Radial Obstruída entre Limeira e Mogi-Guaçu

Neste caso de Mogi-Guaçú, o município de Estiva Gerbi está devidamente coberto pelo sinal, assim como Conchal, sendo que também há contribuição de sinal em Itapira a uma distância de 15 km e intensidade de campo de 48 dB $\mu$ V/m. Lembrando que a cidade de Itapira é de responsabilidade da prefeitura, esta estaria coberta com sinal digital de intensidade de 48 dB $\mu$ V/m. Este é um exemplo de caso em que a cidade estaria com o serviço de TV Digital disponível num período de tempo mais curto do que se a prefeitura tivesse que viabilizar um novo canal digital.

Para a cobertura adequada de Espírito Santo do Pinhal e Santo Antônio do Jardim ambas de responsabilidade da prefeitura haveria a necessidade de se ativar um posto em Espírito Santo do Pinhal. ou em Santo Antônio do Jardim.

## 5.6 Expandindo o “Braço” Leste

O primeiro posto retransmissor do “braço” Leste é Amparo, que deve cobrir segundo a regra de replicação Monte Alegre do Sul. Procedendo-se a simulação com os parâmetros potência ERP 80 W, CBT+HCF 1100 m e antena onidirecional, vem a Figura 5.25.

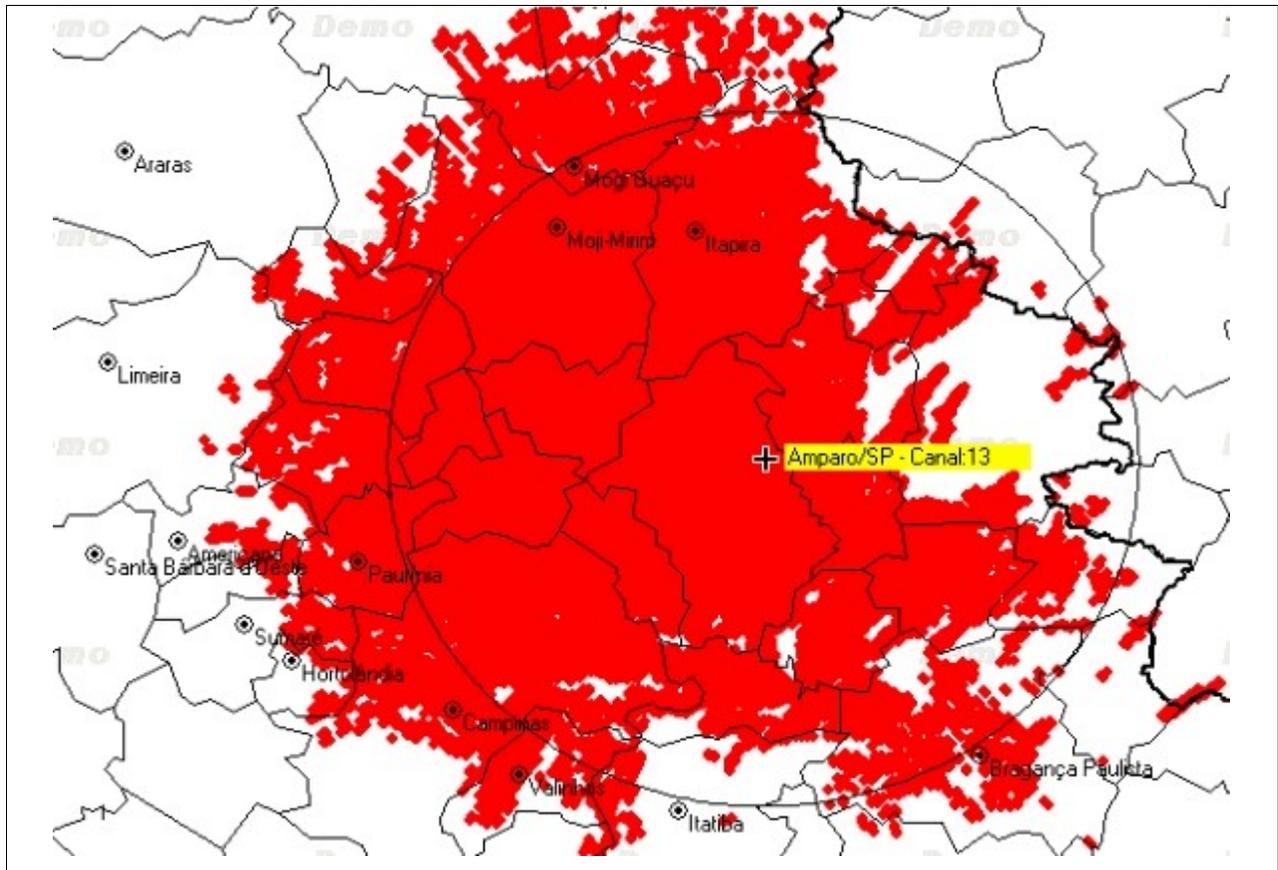


Figura 5.25 Área de Cobertura de Amparo com 80 W ERP

Da Figura 5.25, observa-se que devido à altitude relativa do posto de Amparo, o sinal chega até Campinas, Paulínia, Cosmópolis, além do raio de 38 km, sendo a intensidade de campo em Campinas de  $50 \text{ dB}\mu\text{V/m}$ . Porém, este sinal sofre variações da ordem de amplitude de  $20 \text{ dB}\mu\text{V/m}$ .

Como não interessa para a rede sinais que cheguem além do raio de 38 km, deve-se reduzir a potência ERP de Amparo e usar uma antena diretiva. Os novos parâmetros são potência ERP 40 W, antena diretiva e mesmo ponto de transmissão. A Figura 5.26 mostra o diagrama de irradiação da antena.

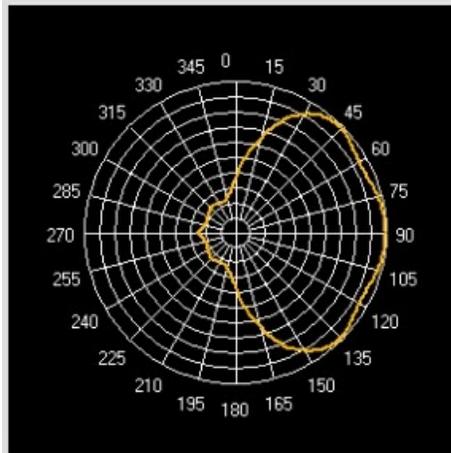


Figura 5.26 Diagrama da Antena Diretiva Utilizada para Amparo Orientação 90°.

A área de cobertura ficou como mostrado na Figura 5.27, especificando as cidades de interesse.

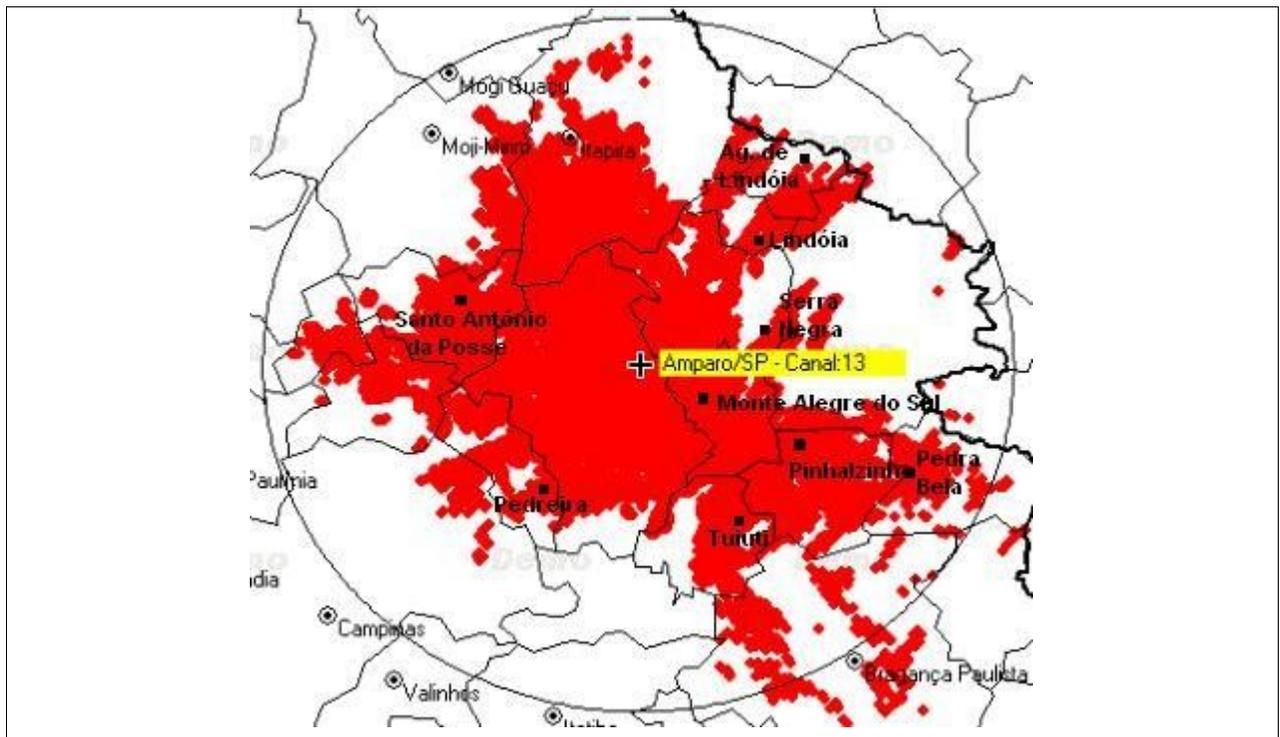


Figura 5.27 Área de Cobertura de Amparo com os Novos Parâmetros.

Da Figura 5.27 observa-se que a cobertura foi reduzida, porém Monte Alegre do Sul recebe sinal conforme Tabela 5.1 satisfazendo a proposta de replicação.

Várias cidades cuja transmissão é de responsabilidade das prefeituras locais recebem o sinal digital como Tuiuti, Pinhalzinho, Pedreira, Serra Negra e Pedra Bela. Santo Antônio da Posse que pertence à rede recebe uma contribuição de sinal de Amparo e da geradora principal de Campinas.

O último posto a ser simulado do lado leste da rede é o de Águas de Lindóia, que neste projeto deve cobrir a cidade de Socorro que é de responsabilidade da prefeitura. Para isso foi usada uma antena diretiva, Figura 5.28, em conjunto com os seguintes parâmetros, potência ERP 80 W (CBT+HCF), 1045 m e antena com orientação 135°.

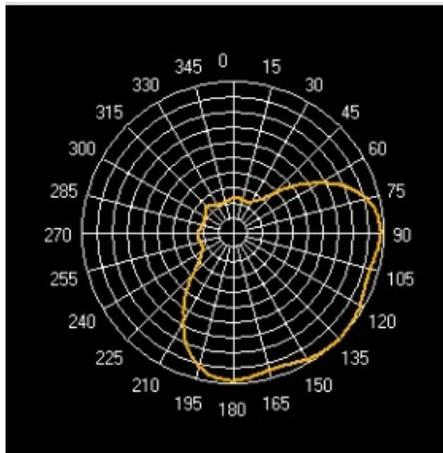


Figura 5.28 Diagrama da Antena Diretiva do Posto de Águas de Lindóia

A área de cobertura ficou como mostrado na Figura 5.30, e na Figura 5.29 é mostrado o perfil de terreno entre Itapira e Águas de Lindóia.

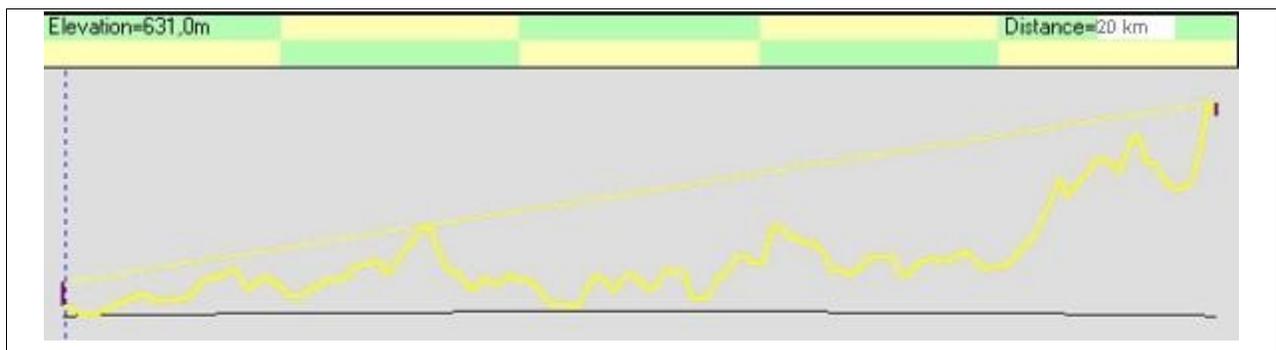


Figura 5.29 Perfil de Terreno Obstruído na Radial Itapira - Águas de Lindóia

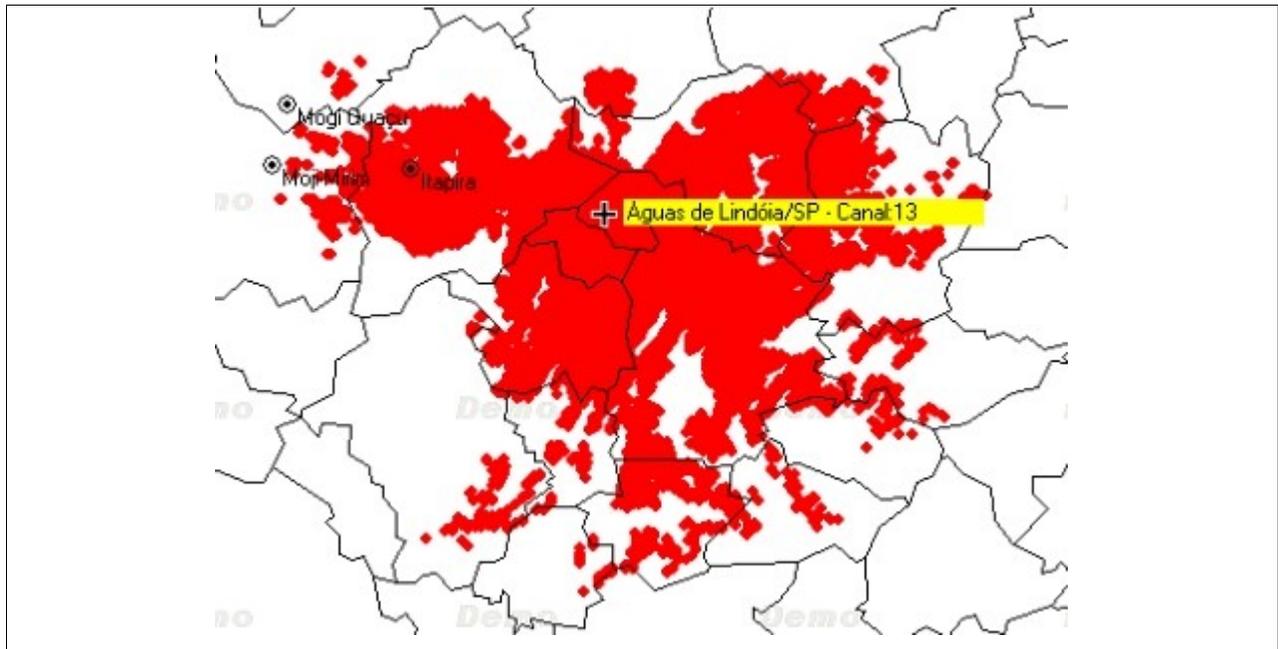


Figura 5.30 Área de Cobertura de Águas de Lindóia e a Cidade de Socorro

O procedimento adotado em Águas de Lindóia foi possível porque Itapira recebe contribuições de sinal de Mogi Guaçu e Amparo.

## 5.7 Expandindo o “Braço” Sul

A região sul da rede é formada pelas cidades de Valinhos e Indaiatuba, que possuem postos retransmissores, sendo que Valinhos cobre Vinhedo e Louveira. Devido às características do relevo da região de Valinhos, o sinal facilmente chegaria à Jundiaí que não faz parte da rede, logo será usada a potência ERP de 10 W, uma antena diretiva na direção de Indaiatuba e (HCF+CBT) igual a 1000 m. A Figura 5.31 mostra o diagrama de irradiação da antena utilizada em Valinhos.

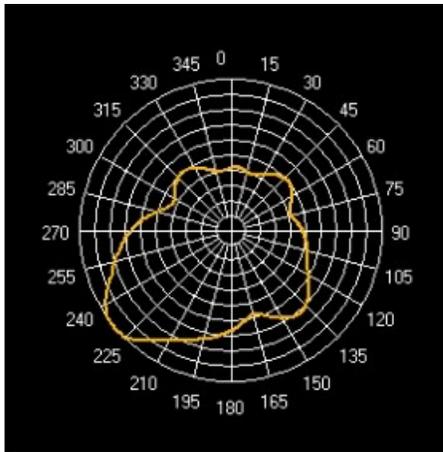


Figura 5.31 Diagramas de Irradiação da Antena Escolhida para a Cidade de Valinhos

A área de cobertura ficou como mostra a Figura 5.32, especificando as cidades de interesse.

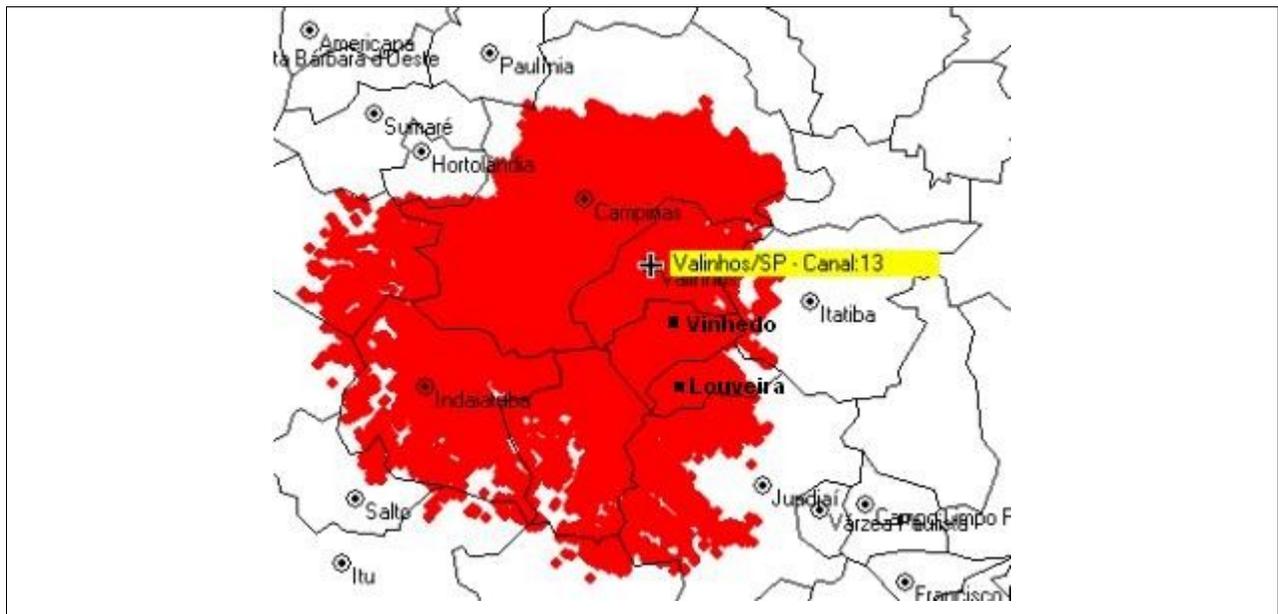
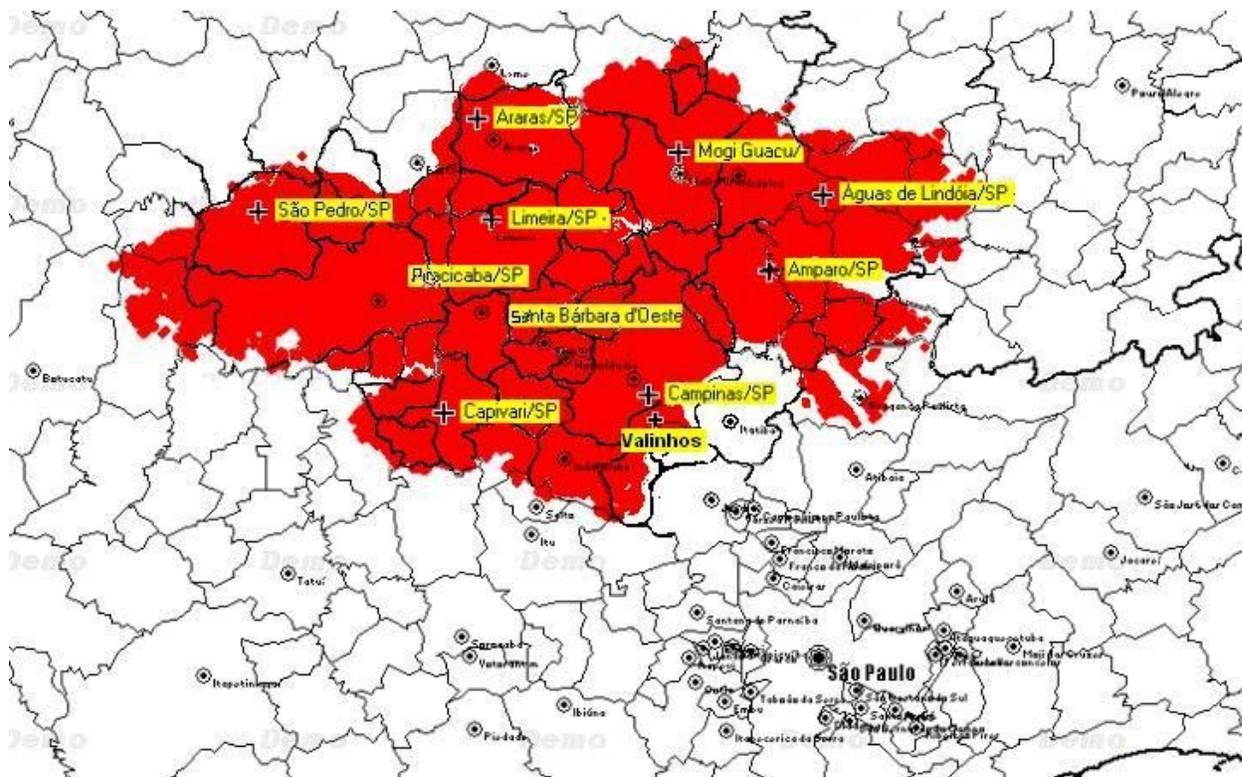


Figura 5.32 Área de Cobertura de Valinhos

Observa-se da figura, que Indaiatuba recebe contribuição de sinal de Valinhos, assim como Vinhedo e Louveira, satisfazendo a proposta de replicação da Tabela 5.1.

A princípio o posto de Indaiatuba não precisaria ser ativado no sistema digital, uma vez que a contribuição de Valinhos é da ordem de  $44 \text{ dB}\mu\text{V/m}$ , em Vinhedo  $48 \text{ dB}\mu\text{V/m}$  e em Louveira é também da ordem de  $48 \text{ dB}\mu\text{V/m}$ .

Este estudo não entra dentro do ambiente urbano, ou seja, fazendo uma analogia com o sinal analógico dentro de uma cidade tem-se a área de sinal ótimo, bom, regular e ruim, porém no digital esta área será dividida em sinal ótimo e sem sinal. No caso em que não foi ativado o posto retransmissor digital em Indaiatuba, haveria de se avaliar a necessidade de melhorar a cobertura com Gap-Fillers se ocorrerem problemas. A Figura 5.33 mostra um esboço da área de cobertura da rede SFN.



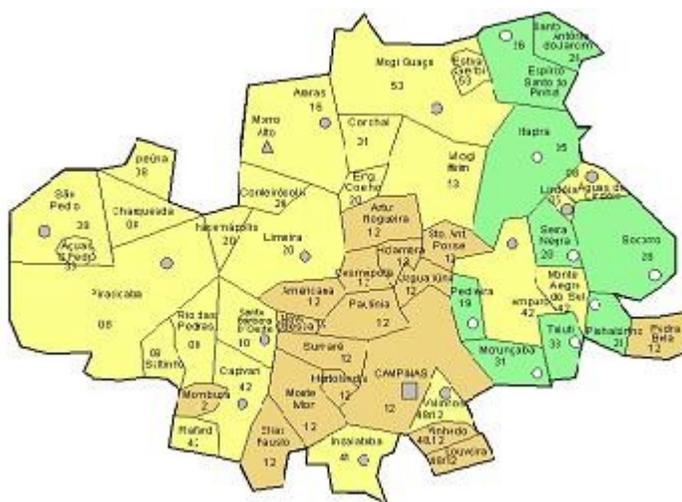


Figura 5.33 Esboço da Área Coberta pela Rede Digital SFN, Canal VHF 13 D e Rede Analógica

A Figura 5.33 mostra como ficou a rede SFN final onde o objetivo maior foi alcançar a replicação da cobertura da rede MFN analógica. Somente as cidades de Espírito Santo do Pinhal e Santo Antônio do Jardim, sob responsabilidade das prefeituras locais, não foram atendidas com sinal digital. Santo Antônio do Jardim não pode receber contribuição de Mogi-Guaçu porque está a 40 km de distância, e Mogi-Guaçu já opera no limite da potência estabelecida pelo PBTVD. Este é um caso que para ser resolvido depende da instalação de um posto retransmissor digital na cidade, entrando-se assim na rede SFN. Conclui-se que a sincronização dos postos é algo essencial para a rede SFN, visto que para utilizar todas as vantagens da rede, ou seja, utilizar os sinais contribuintes de outros postos na técnica de diversidade de espaço, a sincronização deve ser feita de imediato.

## 5.8. Planejamento para recepção móvel

Para a recepção móvel do canal, foi estimada a intensidade de sinal nas seguintes radiais ligando as cidades e simulando o percurso das estradas entre Campinas e Piracicaba, Campinas e Mogi-Guaçu, e Campinas e Águas de Lindóia. A Figura 5.34 mostra uma seção do mapa do DER com estradas de ligação entre as cidades citadas.

As Figuras 5.35, 5.36 e 5.37, sem escala, mostram uma primeira avaliação das condições que seriam encontradas em uma possível transmissão móvel de canal. A intensidade máxima é considerada no ponto do retransmissor, e a intensidade mínima é tomada na fronteira, considerando o sinal mais fraco que chega no ponto.

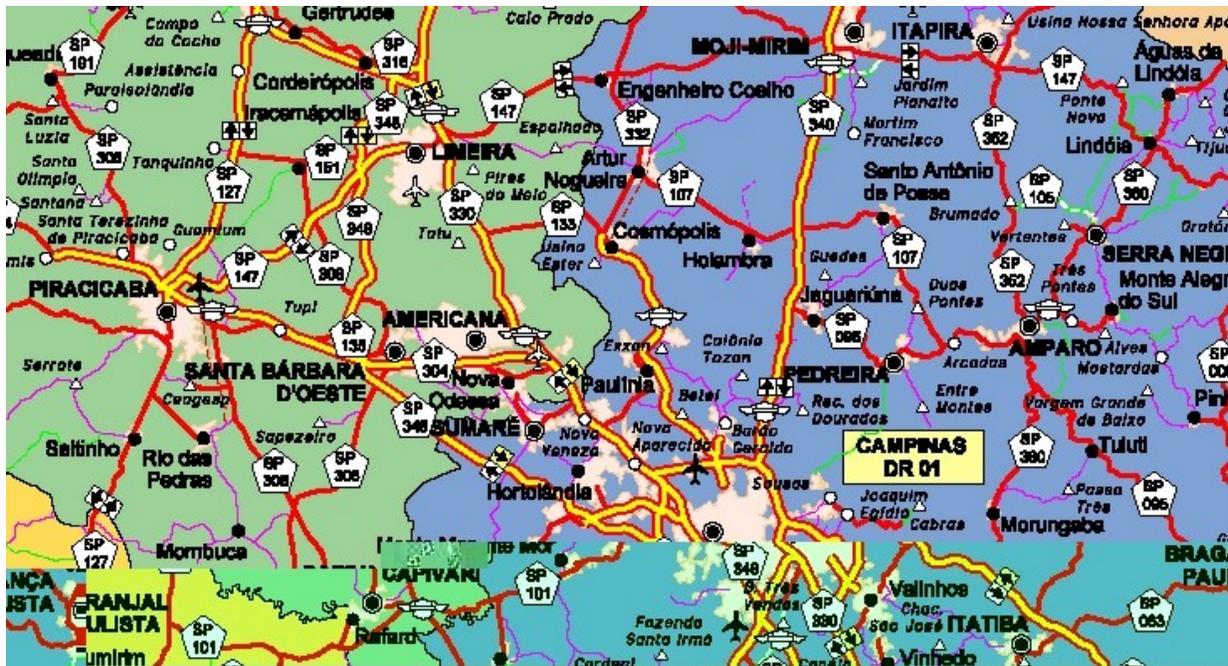


Figura 5.34 Rodovias da Região Campinas Piracicaba. Fonte DER.

Esta é uma situação real porque representa o pior caso onde, por algum motivo, o sinal de contribuição deixou de ser transmitido, existindo somente o sinal mais fraco.

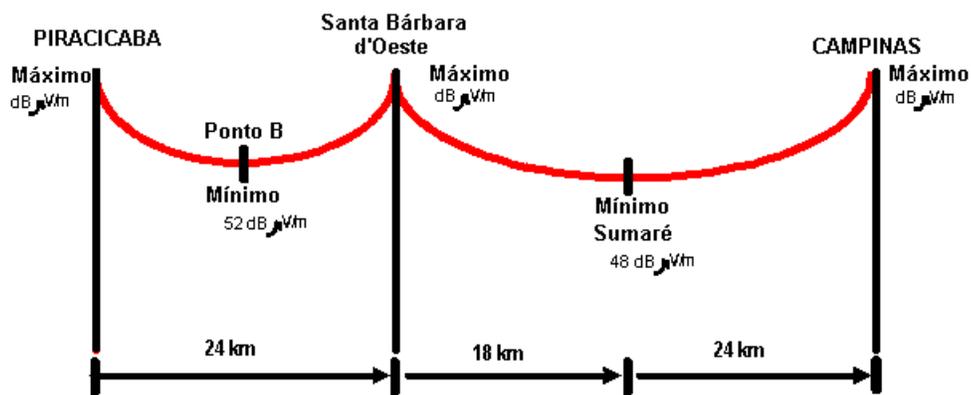


Figura 5.35 Estimativa de Variação do Sinal no Trajeto entre Campinas e Piracicaba

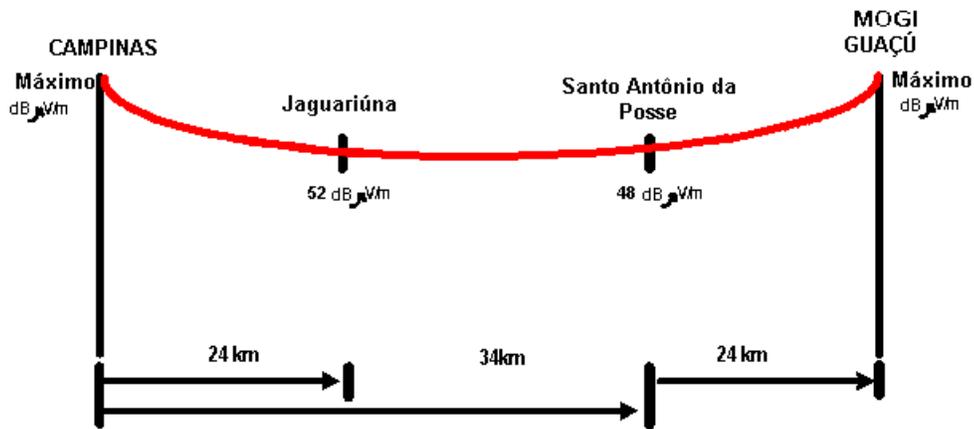


Figura 5.36 Estimativa de Variação do Sinal no Trajeto entre Campinas e Mogi Guaçu

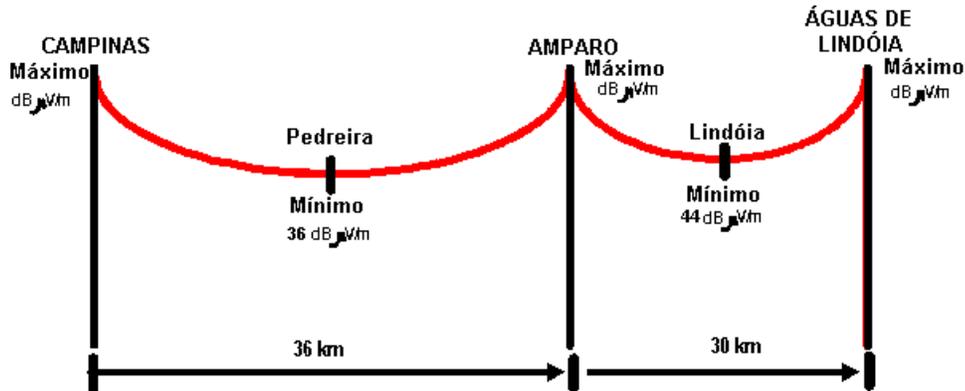


Figura 5.37 Estimativa de Variação do Sinal no Trajeto entre Campinas e Águas de Lindóia

A intensidade mínima de 36dB $\mu$ V/m foi encontrada nas proximidades de Pedreira. Este dado pode servir de base para futuros estudos de recepção móvel de canal em trajetos de estradas, levando-se em consideração outros fatores importantes como Efeito *Doppler* etc.

## 5.8 Sincronismo em Tempo

Para ilustrar este trabalho, será descrito um exemplo de sincronização em tempo da rede com o método utilizado pela rede NHK do Japão, com transmissão COFDM no padrão ISDB-T. O sincronismo em tempo é importante, juntamente com o sincronismo em frequência e fase do sinal, para que a realidade de vários transmissores operando simultaneamente seja equivalente à transmissão de um único

transmissor operando sozinho. Este atraso será geralmente efetuado no elo de micro-ondas que interliga os postos transmissores da rede. Isso será a uma das garantias de que os sinais poderão contribuir e não interferir, não se esquecendo de respeitar outros parâmetros como o intervalo de guarda etc. Outro fato importante é que uma vez em operação, a expansão da rede SFN não deve interromper seu funcionamento normal. Portanto, um intervalo de atraso maior que o mais longo atraso da rede deve ser considerado, para que se permita a expansão da rede sem sua paralisação, reajustando assim os atrasos envolvidos. A Figura 5.38 mostra uma expansão de uma rede SFN, onde é necessário desligar a estação geradora principal para reajustar seu atraso.

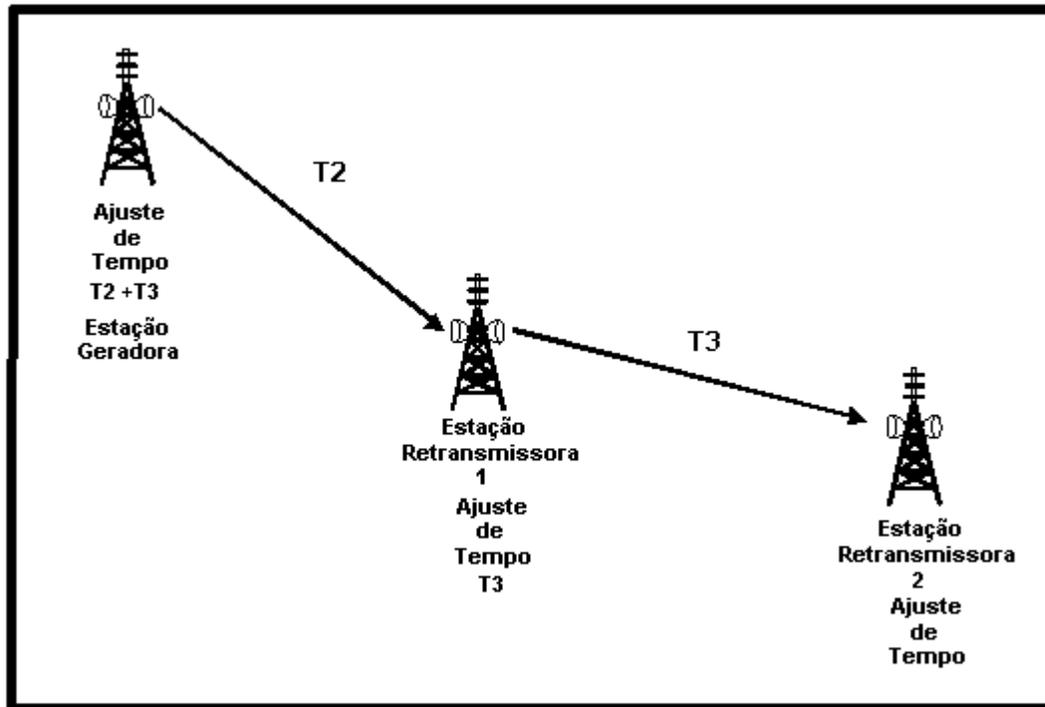


Figura 5.38 Estação Geradora Principal deve ser Desligada para a Expansão da Rede SFN.

A rede SFN deve ser capaz de ser expandida sem deixar de funcionar. Logo, para alcançar este objetivo, é estipulado um atraso máximo maior que o maior atraso real que acontece dentro da rede SFN. Na Figura 5.39 é mostrada a situação descrita.

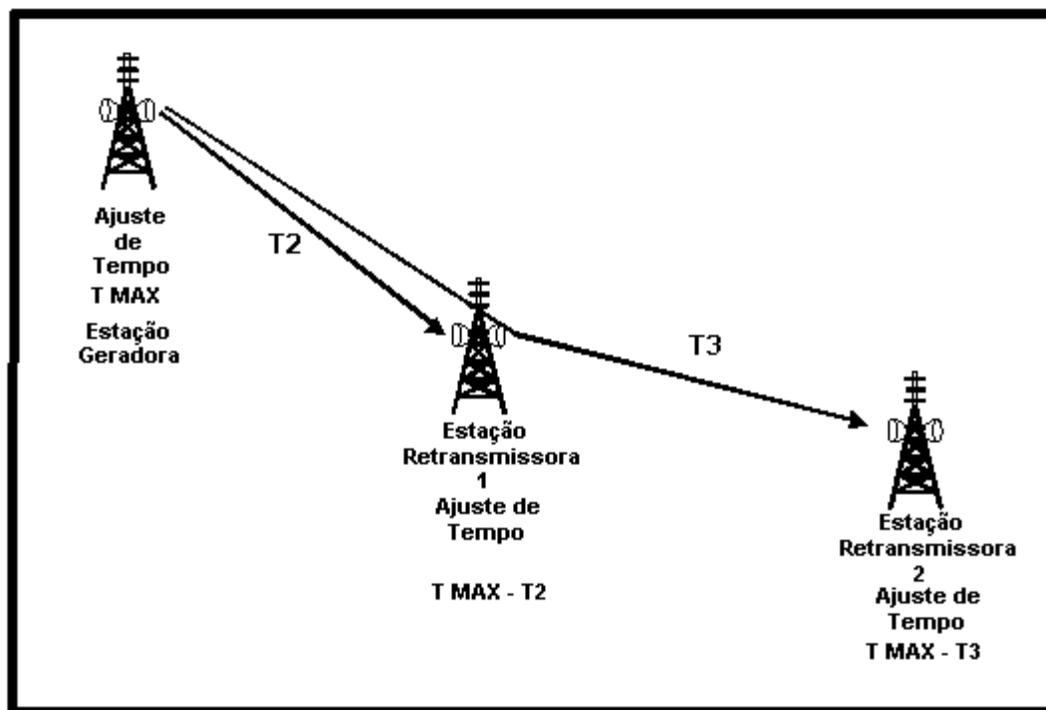


Figura 5.39 Não se Desliga a Estação Geradora Principal para a Expansão da Rede SFN

A Figura 5.40 mostra as distâncias envolvidas entre os elos de microondas na rede, e a Tabela 5.9 mostra os atrasos compilados para a situação proposta considerando um atraso máximo de 500µs para a geradora principal de Campinas em relação ao elo de micro-ondas.

Tabela 5.9 Atrasos Relativos ao Atraso Máximo da Rede

Elo de Micro-Ondas	Atraso Geradora Principal Campinas 500µs			
	Distância(km)	Atraso do Elo (µs)	Atraso Relativo (µs)	
Campinas - SBO	40	133	SBO	367
SBO - Piracicaba	25	216	Piracicaba	284
Piracicaba - S.Pedro	36	337	S.Pedro	163
Campinas - Limeira	53	177	Limeira	323
Campinas - Araras	76	253	Araras	247
Campinas - M.Guaçú	60	200	M.Guaçú	300
M.Guaçú - E.S.Pinhal	32	306	E.S.Pinhal	194
M.Guaçú - Ag.Lindóia	35	317	Ag.Lindóia	183
Campinas - Amparo	42	147	Amparo	353

A coluna atraso relativo da Tabela 5.9 mostra o ajuste de atraso que deve ser feito para o sinal chegar aos postos retransmissores com seus respectivos atrasos, e se obter uma transmissão simultânea. Estes atrasos são feitos ajustando-se as saídas dos moduladores OFDM.

Nas estações retransmissoras também pode ser efetuado um ajuste fino dos atrasos, se for necessário. No caso do sistema utilizado pela NHK, também é adicionado um atraso de  $2\mu\text{s}$  que traduz o atraso para a transformação em frequência intermediária (FI) após a modulação OFDM.

O ajuste fino ( $T_{\text{off}}$ ) é feito na saída do transmissor, e como exemplo foram usados os postos retransmissores de Araras e Mogi-Guaçú, ambos transmitindo para um ponto de Mogi-Mirim. O sinal proveniente de Araras em Mogi-Mirim é menor que  $20 \text{ dB}\mu\text{V/m}$ , como visto antes, mas para efeito deste exemplo o sinal será considerado como um sinal significativo. A Figura 5.39 ilustra a situação.

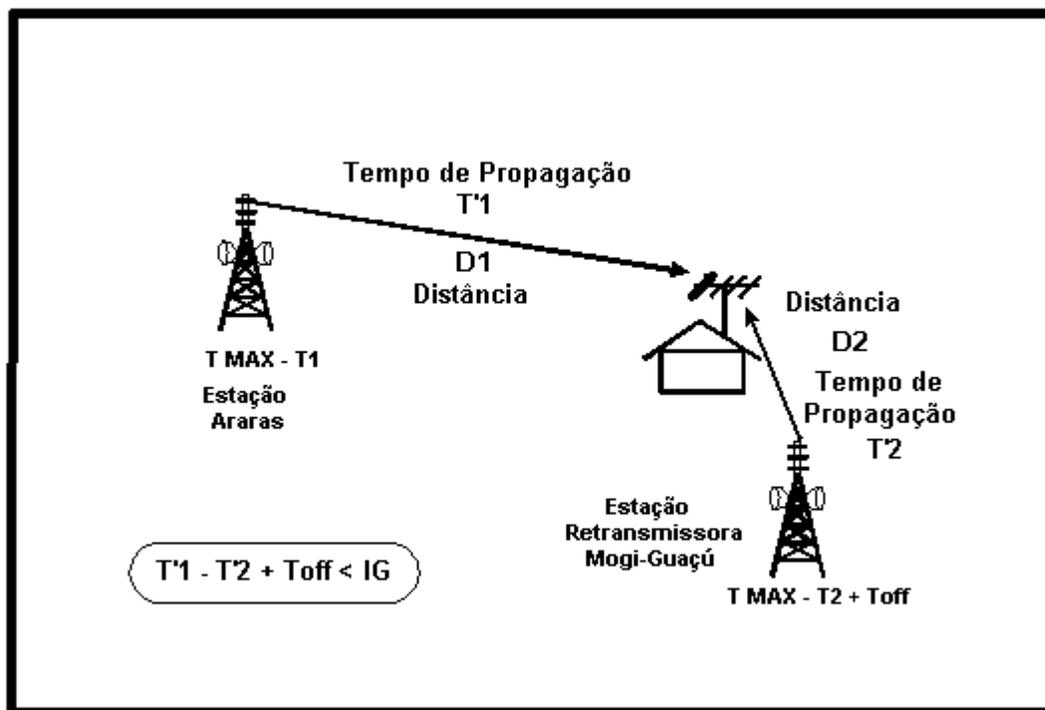


Figura 5.40 Situação Ilustrativa de Araras e Mogi-Guaçú atuando em Mogi-Mirim

Distância entre Araras e Mogi-Mirim  $d1 = 50 \text{ km}$

Distância entre Mogi-Guaçú e Mogi-Mirim  $d2 = 7 \text{ km}$

$d1 - d2 = 43 \text{ km} > 38 \text{ km}$  logo:

$T1' = 166\mu\text{s}$  e  $T2' = 23\mu\text{s}$

sendo  $T1'-T2'=143\mu s > IG$  (Intervalo de Guarda)= $126\mu s$

Sendo  $T1'-(T2'+T_{off}) < IG$  vem:

$T_{off} > 17\mu s$ , ou seja, atrasando-se a saída do retransmissor de um atraso maior que  $17\mu s$ , o sinal poderá ser recuperado em Mogi-Mirim pelo receptor sem problemas, visto que o sinal proveniente de Araras passa a ser de contribuição, uma vez que para este exemplo assume-se este sinal significativo.

Não foram colocadas todas as figuras com o perfil de terreno, entre todos os postos retransmissores, que seriam necessários para a elaboração dos projetos de elos de micro-ondas, isto porque tomariam juntas muitas páginas deste trabalho. As figuras mostradas neste trabalho são suficientes para o entendimento do mesmo.

A rede SFN está assim concluída e sincronizada em tempo, lembrando que também existe o sincronismo de frequência das portadoras sendo que no ISDB-T isso é feito enviando sinal de sincronismo através do link de micro-ondas.

## 5.9 Simulação em Laboratório

A seguir é apresentada a Tabela 5.10 com os resultados da simulação feita em laboratório, utilizando o simulador para o sistema ISDB-T, para se avaliar o tempo de sincronização do receptor diante de sinais baseados em dados reais que poderiam chegar a uma antena receptora.

Os dados de simulação foram para o ISDB 6 MHz [25], tempo de símbolo  $T_s=1134\mu s$  ( $\mu s$ ) (para  $IG=1/8$  8k Mode) e Intervalo de Guarda  $IG=126\mu s$ .

Tabela 5.10 Pontos de Estudo

Radial ao Ponto	Distância (km) / Normalizada (km)	Intensidade de Campo (dB $\mu$ V/m)	Atraso $\tau$ ( $\mu s$ ) / Normalizada. ( $\mu s$ )	Sincronismo após 'N' Amostras
Campinas-SBO	38 / 16	30	126 / 68,6	470 amostras
Capivari-SBO (*)	29,5 / 7,5	18	98,3 / 25,3	
Piracicaba-SBO	24 / 2	27	80 / 7	
Limeira-SBO	22 / 0	25	73 / 0	
Indaiatuba-SBO(*)	38 / 16	17	126 / 70	

Radial ao Ponto	Distância (km) / Normalizada (km)	Intensidade de Campo (dB $\mu$ V/m)	Atraso $\tau$ ( $\mu$ s) / Normalizada. ( $\mu$ s)	Sincronismo após 'N' Amostras
Ag.Lindóia-Amparo	26(*) / ?	7	86,6(*)/ ?	328 amostras
Mogi-Guaçu-Amparo	33 / 0	15	110/ 0	

Radial ao Ponto	Distância (km) / Normalizada (km)	Intensidade de Campo (dB $\mu$ V/m)	Atraso $\tau$ ( $\mu$ s) / Normalizada. ( $\mu$ s)	Sincronismo após 'N' Amostras
Limeira-Paulínia	34(*) / ?	20	113(*)/ ?	342 Amostras
Campinas-Paulínia	19 / 0	64	63/0	

Radial ao Ponto	Distância (km) / Normalizada (km)	Intensidade de Campo (dB $\mu$ V/m)	Atraso $\tau$ ( $\mu$ s) / Normalizada. ( $\mu$ s)	Sincronismo após 'N' Amostras
M.Guaçu-M.Mirim	10 / 0	45	33 / 0	549
Ag.Lindóia-M.Mirim	34(*) / ?	45	113(*) / ?	
Amparo-M.Mirim	36(*) / ?	15	120(*) / ?	

(\*) Radial Obstruída e distância normalizada é tornar a menor distância zero como referência

O simulador, para sincronizar com os sinais que chegam, procura nas amostras FFT do sinal o ponto de maior correlação, uma vez alcançado este ponto o sinal está sincronizado. Nestas condições de simulação, um símbolo tinha a duração de 0,14583 $\mu$ s, então conclui-se que para o pior caso de 549 amostras, o receptor demoraria cerca de 80 $\mu$ s para sincronizar e, no melhor caso, com 328 amostras o receptor demoraria aproximadamente 48  $\mu$ s.

## 5.10 Comentários

O presente capítulo procurou mostrar que a utilização da rede SFN para a retransmissão de sinais de TV digital é factível. Deixou claro que o sinal de contribuição pode ser utilizado para se melhorar as áreas de cobertura conforme mostraram os resultados. Foi mostrado que a distância de 38 km é uma distância considerada prática dentro de uma rede já existente, podendo ser usada sem maiores problemas para que se possa assim reutilizar a infraestrutura existente, evitando-se ao máximo a construção de novos postos retransmissores para o sinal digital. Neste ambiente de simulação foi considerado que o sinal que alimenta o posto retransmissor chega através de um enlace de microondas. Essa é a situação real da rede analógica estudada, que a princípio também alimentará um codificador que fornecerá em sua saída um TS (*Transport Stream*) para alimentar o transmissor digital. As medidas efetuadas em campo serão de extrema importância para a confirmação das simulações e estudos teóricos a exemplo de [42].

## Capítulo 6

### Conclusões e Trabalhos Futuros

#### 6.1 Replicação da Área de Cobertura

A maior contribuição deste trabalho foi sem dúvida nenhuma acender uma luz na direção da melhoria do uso da canalização de retransmissão de TV, aproveitando, uma importante mudança na transmissão da TV terrestre, permitindo extrair o máximo das vantagens que a tecnologia atual oferece. A segunda maior contribuição será o fato de que se este sistema vier a ser executado na prática, mais rápida será a implantação da TV digital no interior do país aproveitando-se com bons projetos de cobertura todos os sinais contributivos.

A área de cobertura inicialmente proposta foi quase que integralmente coberta. Das sessenta cidades a serem cobertas, somente duas não o foram, representando 3,5% do total. Estas cidades não puderam ser cobertas com sinal de contribuição, porém a responsabilidade da retransmissão é da prefeitura local e não da geradora executante do serviço. Contudo, seguindo a estratégia deste trabalho, um dos objetivos inicialmente considerados foi o de cobrir com sinal de contribuição as cidades cuja responsabilidade de cobertura é da prefeitura, para que estas cidades não sejam penalizadas com a demora da viabilização e outorga de um novo canal digital. Este trabalho entende que assumindo tal estratégia, para estes casos, haverá um ganho de tempo na implantação da TV digital, e certamente isto ocorrerá em cidades pequenas que possivelmente possuem prefeituras sem grandes recursos para investimentos em TV digital, e que em geral não são atrativas comercialmente para as grandes redes de televisão.

Este resultado mostra a viabilidade do método apresentado sendo que a estratégia de se usar o sinal de contribuição para tal fim é uma das melhores utilizações que se poderia esperar dos sistemas de transmissão baseados em OFDM.

## 6.2 Contribuições de Sinal de Vários Transmissores

No presente caso estudado houve a economia de um único posto retransmissor, porém este resultado pode ser maior em áreas de retransmissão onde existem várias cidades próximas umas das outras e existe também um canal diferente para cada cidade pertencente a uma mesma geradora de TV. Logo, a rede SFN para esta região encontraria um compromisso entre a cobertura ideal de todas as cidades, estabelecendo a diversidade ideal para a cobertura, e ainda traria uma diminuição de postos retransmissores se comparado ao sistema MFN.

Como já dito anteriormente a estratégia de se trabalhar com diversos sinais contributivos pode, dependendo da região geográfica da rede, diminuir o número de postos retransmissores e prover uma melhor cobertura da área de atuação da geradora.

## 6.3 Uniformidade da Rede e Custos

Comparativamente a uma rede de retransmissão MFN, que muda de canal a cada cidade, a rede SFN é mais uniforme, apresentando um ganho de diversidade que torna o ambiente mais controlado pelo radiodifusor. Se o transmissor de uma determinada cidade sair fora de operação, esta cidade inteira perde o sinal da estação geradora, porém se o mesmo acontecer em uma rede SFN, existe grande possibilidade de que parte desta cidade esteja recebendo sinal de contribuição de outro transmissor da rede, sendo, portanto, menos grave a perda de um transmissor. Isto reflete diretamente na diminuição de prejuízos para a estação geradora quando se sai do ar por problemas técnicos. Outra vantagem econômica é que se a rede for SFN, todos os transmissores podem ser iguais, logo, existe uma uniformidade maior de equipamentos utilizados e a emissora pode inclusive ter um transmissor de reserva para atender todos os postos retransmissores em caso de emergência, o que não seria possível se o sistema fosse MFN.

## 6.4 Recepção Móvel

Com a rede SFN o ambiente para recepção móvel em banda larga está mais uniforme evitando-se problemas de chaveamento de sinal caso o sistema fosse MFN. Este trabalho sempre entendeu que a recepção móvel de canal é para ser utilizada em veículos de transporte como ônibus de viagem, onde não existe o problema de esgotamento rápido da bateria, atendendo assim a mobilidade de que trata o decreto governamental. Embora sejam necessários testes de campo para validação do sistema seria perfeitamente possível, por exemplo, viajar em um ônibus de Campinas à Piracicaba assistindo a programação da TV aberta. As pesquisas com diversidade de antenas especiais para veículo estão evoluindo rapidamente e também é um novo conceito a ser explorado, pesquisado e desenvolvido.

## 6.5 Diferenças no Planejamento

O planejamento de uma rede SFN tem um conceito diferente do planejamento MFN. O planejamento MFN, em princípio, é feito visando a máxima potência para se alcançar determinada cobertura, enquanto que no planejamento SFN, tenta-se alcançar a maior uniformidade possível de sinal dentro da área de cobertura, sendo que na maioria dos casos as potências envolvidas são bem menores quando comparadas ao planejamento MFN. Alguns cuidados são necessários, como saber utilizar o fator distância versus potência, para que se tenha nos receptores a maior quantidade de sinais contributivos, melhorando-se a performance da rede. Pode-se assim concluir que o planejamento de uma rede SFN é mais elaborado em termos de cobertura do que o planejamento MFN. Em termos de interferência a rede SFN se apresenta com mais alternativas para o projetista, uma vez que sempre havendo sinais contributivos, a questão pode ser resolvida com uma nova distribuição de sinal na área de interferência. Quando o sistema é MFN, existe a alternativa de se diminuir a potência, ou trocar o sistema irradiante. Mas como as potências envolvidas geralmente são menores, a interferência tende a ser menor também.

## 6.6 Sincronismo

Como foi visto anteriormente, o sincronismo é fundamental para o funcionamento da rede SFN, porque a contribuição dos sinais se dá na medida que existe uma perfeita simultaneidade de irradiação de sinal. O termo transmissão simultânea distribuída caberia bem ao sistema SFN. A forma mais usada de

sincronismo entre os transmissores é feita utilizando-se o relógio de GPS, porém pode ser feita com qualquer outra referência que estiver disponível na rede, como um sinal de relógio que é inserido nos enlaces de microondas que alimentam toda a rede. Do lado do receptor a tecnologia está evoluindo rapidamente e os receptores de última geração OFDM já são capazes de operar em ambiente com severo multipercurso, onde ocorrem desvios de fase.

## 6.7 Trabalhos Futuros

Um dos pontos a serem explorados na seqüência deste trabalho é o fato de a rede SFN estar limitada a uma mesma programação, isto porque em intervalos de tempo determinados, durante a execução da programação de uma geradora de TV para outra, pode ocorrer a mudança do sinal. No caso de uma comercialização local, a rede SFN encontraria problemas porque o sinal irradiado não é o mesmo para todos os transmissores da rede. Estudos no sentido de tornar a rede inteligente, identificando estes momentos e variando seus parâmetros de transmissão, como potência, sincronismo, etc, para localmente se irradiar um sinal diferente, vem sendo simulados e testados no Laboratório de Comunicações Visuais LCV da Unicamp. Outro ponto importante de estudo é o desenvolvimento do Filtro Cancelador de Realimentação, que possibilitará a captação do sinal do ar em determinadas circunstâncias, detalhe que irá diminuir os custos de operação da rede.

## Referências Bibliográficas

- [1] ITU-R Recommendation BT 500-11, 'Methodology for the subjective Assessment of the Quality of Television Pictures'. 1998
- [2] Anexo à Resolução N.º 284 de 7 de Dez. de 2001 [www.anatel.gov.br](http://www.anatel.gov.br)
- [3] Chiquito, José Geraldo e Fasolo, Sandro Adriano 'Transmissão de Dados por Multiplexagem em Frequência (OFDM)', Publicação da FEEC 07/97 - DECOM -FEEC -UNICAMP
- [4] Chang, R. W., 'Synthesis of Band Limited Orthogonal Signals for Multichannel Data Transmission,' Bell System Tech., 45 Dec 1996.
- [5] Weinstein, S. B. and Ebert, P. M., 'Data Transmission by Frequency-Division Multiplexing Using the Discrete Fourier Transform', IEEE trans. Commun., COM-19, Oct. 1971.
- [6] Peled, A. and Ruiz, A., 'Frequency Domain Data Transmission Using Reduced Computation Complexity Algorithms', In proc. IEEE Int. Conf. Acoustic., speech, Signal Processing, Denver, CO, 1980.
- [7] Nee, R. V. and Prasad, R., 'OFDM for Wireless Multimedia Communications', Norwood, MA: Artech House Universal Personal Communication Library, 2000.
- [8] Z. Liyi, L. Deli, 'Interference Suppression in Cochannel Relay Television System', D.E.I. E., University of Technology, Taiyuan, P.R. China, 1998
- [9] Edfors, O., Sandell, M., Beek, J. J. V., Landstrom, D. and Sjoberg, F., 'An Introduction to Orthogonal Frequency-Division Multiplexing', Lulea University of Technology, 1996.
- [10] Cimini L.J, Greenstein L. J. Orthogonal Frequency-Division Multiplexing. IN PROAKS J.G. (Ed.). Wiley Encyclopedia of Telecommunications and Signal Processing. [SI]: John Wiley & Sons, Inc., 2003

- [11] Zou, William Y. e Wu, Yiyan, 'COFDM : AN Overview' IEEE Transactions on Broadcasting, Março de 1995.
- [12] 'DVB mega frame for Single Frequency Network (SFN), EBU-UER, ETSI TS 101 191 v1.4.1, June 2004.
- [13] C., Akamine 'Análise de Desempenho do Sistema de TV Digital DVB-T com Entrelaçador Temporal em Canais com Ruído Impulsivo', Dissertação (Mestrado), Unicamp, 2004.
- [14] B. Sklar, "Rayleigh Fading Channels in Mobile Digital Communications Systems," *IEEE Communications Magazine*, Jul. 1997.
- [15] Y., Michel Daoud., 'Foudation of Mobile Radio Engineering', Boca Raton Florida, CRC, 1993
- [16] W. C. Y. Lee, *Mobile Communications Design Fundamentals*, 2nd ed., New York, NY: John Wiley & Sons, 1993. ch. 2.
- [17] W. C. Y. Lee, *Mobile Cellular Telecommunications System*, McGraw-Hill, 1989.
- [18] A. Mattsson, 'Single Frequency Networks in DTV', IEEE Transactions on Broadcasting, Vol. 51, N°. 4, December 2005.
- [19] Anexo 1, Anexo 2, Anexo 3 à Resolução N.º398, de 7 de Abril de 2005 [www.anatel.gov.br](http://www.anatel.gov.br)
- [20] CPqD, Relatório Técnico: Planejamento de Canais de TV Digital, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações, [www.anatel.gov.br](http://www.anatel.gov.br), setembro de 2003.
- [21] A. Menassian., *Implantação de TV Digital do Brasil*, Palestra ANATEL, [www.anatel.gov.br](http://www.anatel.gov.br), janeiro de 2005.
- [22] CPqD, Relatório de Análise dos Testes de Laboratório e Campo de Sistemas Digitais Realizados no Brasil', Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações, [www.anatel.gov.br](http://www.anatel.gov.br), 2001.

- [23] Anatel, Anexo à , Resolução 284, setembro de 2001, Regulamento Técnico para a Prestação do Serviço de Radiodifusão de Sons e Imagens e do serviço de Retransmissão de Televisão
- [24] ARIB STD-B31 V. 1.2 “Transmission System for Digital Terrestrial Television Broadcasting ARIB Standard,” Association of Radio Industries and Businesses, January 24, 2002;
- [25] European Telecommunications Standard Institute, "Digital Video Broadcasting (DVB); ETS 1999
- [26] S. Nakahara, S. Moriyama, T.Kuroda, M. Sasaki, S. Yamazaki, O. Yamada, 'Efficient Use of Frequencies in Terrestrial ISDB System', iEEE Trans.on Broadcasting, vol42,NO.3 sep. 2001
- [27] P. Cañizares, J.L.Torres, J.A. Martinez, (Retelevision): *VIDITER: Spanish experience on DTT* (20th International Television Symposium, Montreux), Record Cable/Satellite/Terrestrial, pp. 219–224, 1997.
- [28] M.C.D. Maddocks, B. Tait, N. J. Laflin,G. Doel, ' The Plan for Digital Terrestrial Television in the U.K'.,International Broadcasting Convention, Conference Publication No.428, 1996
- [29] S. A. Fasolo, Equalização em Receptores de Televisão Digital de Alta Definição utilizando Modulação 8VSB, Tese de Doutorado, FEEC-UNICAMP, 2001.
- [30] W.Bretl, R. Citta, 'Single Carrier VSB Digital Television Transmission, Single Ferquency networks, and RepeaterSystems', Zenith Electronics Co.,IEEE 0098 3063, 1996
- [31] Draft EN 301 191: Digital Video Broadcasting (DVB); *DVB mega-frame for Single Frequency Network (SFN) synchronization*, European Telecommunications Standards Institute, 1997.
- [32] G.Malmgren, 'On the Performance of Single Frequency Networks in Correlated Shadow Fading', IEEE Transactions on Broadcasting, Vol. 43, No.2, June,1997.
- [33] A.G. Guimarães, E. L. Pinto, 'Técnicas de Simulação de Canais Rádio Móveis',Telecomunicações Vol. 04 No.01, 2001.

[34] H. Hamazumi, K. Imamura, N. Iai, K. Shibuya and M. Sasaki, *A Loop Interference Canceller for the Relay Stations in an Single Frequency Network for Digital Terrestrial Broadcasting*, NHK Laboratories Note No. 469, Digital Broadcasting Networks Research Division, 1998.

[35] G.Malmgren, 'Single Frequency Broadcastin Networks', Trita -S3-RST-9701,ISSN 1400-9137, April,1997.

[36] J.Wang, Z. Yang, C. Pan.,' A New Implementation of Single Frequency Network based on DMB-T' State Key Lab.on Microwave & Digital Comm.,Tsinghua University, April,2004.

[37] V. Mignone, A. Morello, M. Visintin, 'An Advanced Alghorithm for Improving DVB-T Coverage in SFN', International Broadcasting Convention, Conference Publication No.447, IEE,1997

[38] Rebhan R., Zander J., ' On the Outage Probability in Single Frequency Networks for Digital broadcasting',Ieee trans. on Broadcasting, vol.39 no. 4, 1993

[39] R.Brugger, D. Hemingway, 'OFDM Receivers-Imact on Coverage of Inter-Symbol Interfrence and FFT Window Position', EBU Technical Review, July 2003.

[40] ITU-R 205/11 Transmission Performance of ISDB-T

[41] NHK Laboratories Note No.476 , Y. Zungkon, Naohiko I., K. Tsuchida, S. Moriyama'A Study on Adaptive Soft-Decision Decoding for QPSK-OFDM on Multipath Cannels, 2001.

[42] D. Iles, TV Transmission, Large Area Single Frequency Networks - A field Study into the Pratical Applications, NTL,Broadcast Papers.2001.

[43] ITU-R Recommendation P.1546, 'Method for Point-to-Area Predictions for Terrestrial Services in the Frequency Range 30 to 3000 MHZ', 2001

# Anexo I

## Ferramentas Utilizadas nas Simulações

Para a realização das simulações de cobertura, vários softwares foram considerados sendo alguns muito mais completos em termos de resultados de simulação e apresentação. Geralmente esses softwares não estão adaptados às condições brasileiras, não possuindo em seu banco de dados mapas detalhados da região sul, enfocando muitas vezes apenas a América do Norte e Europa. Outro problema é que todos estes softwares são proprietários, cujo uso só é permitido mediante pagamento da licença de uso. Com o início dos estudos da TV Digital no Brasil, a Anatel através do CPqD, resolveu disponibilizar para as emissoras de TV um software gratuito para a análise de interferência e cobertura, porém este software *demo* trabalha somente a cobertura ponto-área, não sendo possível o levantamento do perfil do terreno ponto a ponto. Continuando a busca por um software livre, foi encontrado na Internet o software *Radio Móbile*, que preenchia as necessidades das simulações a serem efetuadas. Então, com o objetivo de se usar softwares gratuitos e disponíveis a todos, foram utilizados a versão *demo* disponibilizada pelo CPqD e o software livre *Radio Mobile*. A seguir são descritas as principais características dos referidos softwares.

### **Software Análise de Interferência Versão Demo 1.0.0.0**

A grande facilidade de um software feito para as condições brasileiras é que ele já contém em sua base de dados todas as localidades brasileiras, assim como alguns dados dos municípios em estudo.

Existem três possibilidades de gerar a intensidade de campo elétrico da emissora:

- ERP opção **150m** e CBT+HCF, opção **HNMT +150**; o programa faz com que a altura da antena seja ajustada para que a ERP seja a máxima em todas as direções, até atingir a distância do contorno protegido teórico da emissora em estudo;
- ERP opção **150m** e CBT+HCF **Definida**: o programa faz com que a ERP seja ajustada em todas as direções, até atingir a distância do contorno protegido teórico da emissora em estudo;
- ERP **Opção Instalada** e CBT+HCF **Definida**: o programa utiliza os dados de instalação da emissora em estudo.

Para os propósitos deste estudo, o programa foi ajustado para a última opção, pois o interesse é simular as reais condições de propagação em uma infraestrutura real, mesmo que o contorno protegido teórico não seja atingido. Uma das facilidades do programa são os modelos predefinidos de diagramas de antenas que auxiliam no caso de se utilizar antenas diretivas para otimização da cobertura. Também é possível a criação de limitações no diagrama de irradiação para o atendimento de limitações impostas pela legislação.

O software utiliza o modelo ponto-área da ITU-R P.1546-1 [43] e se considera o TCA (*Terrain clearance angle*). O resultado de interesse deste estudo se dá através de uma mancha do campo elétrico protegido da emissora em estudo. Pode-se também traçar o campo elétrico por radial.

O programa foi concebido para a análise de interferências, mas pode ser usado perfeitamente para o levantamento das áreas de cobertura dos pontos de estudo. Um aperfeiçoamento deste programa poderia ser a mostra de áreas de cobertura de vários pontos transmissores simultaneamente na tela.

### **Software *Radio Móbile***

Este software é gratuito, porém ele só tem a base de dados de algumas regiões do hemisfério norte, e para completá-lo com os mapas do Brasil, é necessário baixar da Internet os mapas em formato .HGT.

Este programa permite, entre outras facilidades, que se obtenha o perfil do terreno entre dois pontos, fato importante para saber se há ou não obstrução na radial em estudo, ou seja, se há obstrução na Zona de Fresnel.

Para o estudo realizado este software serviu para comparação entre os resultados apresentados e para se obter o perfil do terreno nas respectivas radiais.

## **Artigos Publicados**

- Silvio Renato Messias de Carvalho, Yuzo Iano e Rangel Arthur, “Planejamento da Expansão do Serviço de Retransmissão de TV Digital no Brasil usando redes SFN”, Revista Científica Periódica - Telecomunicações, Vol 08, NO. 02 Dez. 2005, INATEL.

## **Artigos Submetidos**

- Silvio Renato Messias de Carvalho, Yuzo Iano e Rangel Arthur, “Planificación de la Expansión del Servicio de Retransmisión de TV Digital”, submetido à IEEE Região Sul.