

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E
INFORMÁTICA INDUSTRIAL

MARCO ANTÔNIO COSTA DE BORBA

**MEDIÇÃO DE COBERTURA NO SISTEMA BRASILEIRO DE TV
DIGITAL TERRESTRE**

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

2011

MARCO ANTÔNIO COSTA DE BORBA

**MEDIÇÃO DE COBERTURA NO SISTEMA BRASILEIRO DE TV
DIGITAL TERRESTRE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do grau de “Mestre em Ciências” – Área de Concentração: Telemática.

Orientadora: Keiko Verônica Ono Fonseca

CURITIBA

2011

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial

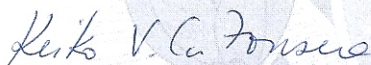
Título da Dissertação Nº 569:

“Aferição de Cobertura no Sistema de TV Digital Terrestre brasileiro”

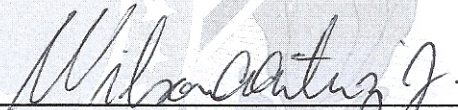
por

Marco Antônio Costa de Borba

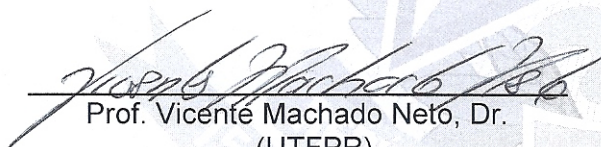
Esta dissertação foi apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de MESTRE EM CIÊNCIAS – Área de Concentração: Telemática, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial – CPGEI – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Campus Curitiba, às 16h do dia 16 de agosto de 2011. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos professores:




Prof^a. Keiko Verônica Ono Fonseca, Dr.
(Presidente – UTFPR)



Prof. Wilson Arnaldo Artuzi Junior, Dr.
(UFPR)



Prof. Vicente Machado Neto, Dr.
(UTFPR)



Prof. Luciano Scandelari, Dr.
(UTFPR)

Visto da coordenação:



Prof. Fábio Kurt Schneider, Dr.
(Coordenador do CPGEI)

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

B726 Borba, Marco Antônio Costa de
Medição de cobertura no sistema brasileiro de TV digital terrestre / Marco Antônio Costa de Borba.— 2011.
88 f. : il. ; 30 cm

Orientadora : Keiko Verônica Ono Fonseca.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. Curitiba, 2011.

Bibliografia: f. 82-85.

1. Televisão digital – Brasil. 2. Processamento de sinais – Técnicas digitais. 3. Medição. 4. Teledifusão. 5. Métodos de simulação. 6. Engenharia elétrica – Dissertações. I. Fonseca, Keiko Verônica Ono, orient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. III. Título.

CDD (22. ed.) 621.3

A todos que empenharam seus esforços não apenas em construir o conhecimento, mas também em compartilhá-lo.

AGRADECIMENTOS

Ao CPGEI e à UTFPR pela oportunidade concedida; aos professores, por compartilharem seus conhecimentos e promoverem a diversidade de perspectivas, em particular ao professor Dr. Alexandre Pohl pelo acolhimento, dinamismo e lucidez ao nortear atividades; à família, por compreender a realocação do tempo; à Rede Paranaense de Comunicação, pelo apoio continuado e pelos recursos materiais e humanos que viabilizaram a tarefa; a todos os colegas, cujo convívio foi atualizador e arejador, em especial aos colegas Adriano da Luz, Célio Vasco e Wyl-liam Silva pelo seu amparo e ensinamentos, e sobretudo pela paciência; à minha orientadora, professora Dra. Keiko Verônica Ono Fonseca, pela guiagem segura, por sua tolerância a minhas limitações, e por propiciar que, mesmo entre muitas árvores, me fosse possível vislumbrar pequena parte da floresta.

A realização deste trabalho só foi possível com apoio da Rede Paranaense de Comunicações, que emprestou recursos humanos e materiais imprescindíveis, e da CAPES, por intermédio do projeto *Formação de Pessoal Qualificado em Sistemas de Transmissão de TV Digital no Paraná*, processo 23038.23556/2008-16 AUX-PE-RH-TVD 249/2008.

Vulnerant omnes, ultima neeat.

RESUMO

BORBA, Marco. MEDIÇÃO DE COBERTURA NO SISTEMA BRASILEIRO DE TV DIGITAL TERRESTRE. 88 f. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2011.

É um interesse permanente das entidades de teledifusão conhecer a região geográfica servida por suas emissões. Modelos computacionais podem fornecer informações detalhadas sobre a área coberta, ao implementar variados métodos de predição baseados em normas e recomendações. Enquanto tais métodos computacionais são indispensáveis à tomada de decisão dos órgãos reguladores, medir o sinal após sua implementação é atividade imprescindível para validar as predições, e para identificar precisamente áreas sem cobertura e orientar na sua solução. Analisar os diversos aspectos envolvidos, e validar uma metodologia prática para conhecer a cobertura real de um sistema de TV digital é o objetivo deste trabalho.

Palavras-chave: Cobertura, Medidas, Multipercurso, Propagação Urbana, UHF, OFDM

ABSTRACT

BORBA, Marco. BRAZILIAN TERRESTRIAL DTV SYSTEM COVERAGE ASSESSMENT. 88 f. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2011.

Knowing the exact region served by a broadcasting station is a permanent interest. Computer models can produce detailed maps of the covered area, by implementing several prediction methods prescribed in specific regulations. While such computer methods are essential to the decision-making process of the regulatory boards, some field-work is still required to validate the predictions, as well as to investigate situations that may give rise to reception difficulties. The analysis of the several aspects involved, and the validation of a practical method for assessing the true coverage of the digital TV system adopted in Brazil is the purpose of this work.

Keywords: Coverage, Measurement, Propagation, Multipath Propagation, Urban Propagation, UHF, OFDM

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – MODELO DO SISTEMA DTTB	20
FIGURA 2 – SONORIZAÇÃO ENVOLVENTE (<i>SURROUND 5.1</i>)	22
FIGURA 3 – MODULAÇÃO 8-VSB	23
FIGURA 4 – MODULAÇÃO COFDM	24
FIGURA 5 – SURGIMENTO DA PROPORÇÃO DE TELA 16:9	25
FIGURA 6 – MUNICÍPIOS PARANAENSES COBERTOS POR TV DIGITAL	27
FIGURA 7 – SUSCETIBILIDADE AO RUÍDO IMPULSIVO	29
FIGURA 8 – DISPERSÃO NAS MEDIDAS DE POTÊNCIA RECEBIDA	40
FIGURA 9 – VARIABILIDADE NAS MEDIDAS DE POTÊNCIA RECEBIDA	43
FIGURA 10 – TRAJETO DO PRIMEIRO AFASTAMENTO NA AV. CANADÁ	48
FIGURA 11 – MEDIDAS SEM TRATAMENTO DE 4,8 A 6,4 KM	48
FIGURA 12 – PRIMEIRO AFASTAMENTO NA AV. CANADÁ	49
FIGURA 13 – TRAJETO DO SEGUNDO AFASTAMENTO NA AV. CANADÁ	50
FIGURA 14 – COMPARAÇÃO ENTRE DUAS PASSAGENS NA AV. CANADÁ	51
FIGURA 15 – TRAJETO DA PRIMEIRA APROXIMAÇÃO NA AV. PARANÁ	52
FIGURA 16 – COMPARAÇÃO ENTRE AV. CANADÁ E AV. PARANÁ	52
FIGURA 17 – DIAGRAMA EM BLOCOS DO SISTEMA DE RECEPÇÃO	58
FIGURA 18 – TELA TÍPICA DO ANALISADOR ETL	59
FIGURA 19 – TRAJETO DA PRIMEIRA PASSAGEM NA AV. GUARAPUAVA	63
FIGURA 20 – PRIMEIRA PASSAGEM NA AV. GUARAPUAVA, DESVIO-PADRÃO .	64
FIGURA 21 – PRIMEIRA PASSAGEM NA AV. GUARAPUAVA, HISTOGRAMA	65
FIGURA 22 – TRAJETO DA PRIMEIRA PASSAGEM NA AV. SILVA JARDIM	66
FIGURA 23 – PASSAGEM NA AV. SILVA JARDIM, DESVIO-PADRÃO	67
FIGURA 24 – PASSAGEM NA AV. SILVA JARDIM, HISTOGRAMA	68
FIGURA 25 – PRIMEIRO AFASTAMENTO NA AV. CANADÁ, DESVIO-PADRÃO ..	69
FIGURA 26 – PRIMEIRA PASSAGEM NA AV. CANADÁ, HISTOGRAMA	70
FIGURA 27 – PRIMEIRO AFASTAMENTO NA AV. CANADÁ, $P(90,50)$	71
FIGURA 28 – RETARDOS MÉDIO E <i>RMS</i> NA AV. PARANÁ	72
FIGURA 29 – RETARDOS MÉDIO E <i>RMS</i> NA AV. BENJAMIN LINS	72
FIGURA 30 – COMPARAÇÃO COM A RECOMENDAÇÃO ITU-R 1546-1	74
FIGURA 31 – MODELO OKUMURA-HATA-SUBURBAN AV. CANADÁ	75
FIGURA 32 – MODELO HATA-EXTENDED-SUBURBAN AV. CANADÁ	76
FIGURA 33 – MODELO FREE SPACE+RMD, AV. CANADÁ	77
FIGURA 34 – HISTOGRAMA DE TODAS AS MEDIDAS	86
FIGURA 35 – HISTOGRAMA DA AVENIDA PARANÁ 1	87
FIGURA 36 – HISTOGRAMA DA AVENIDA PARANÁ 2	87
FIGURA 37 – HISTOGRAMA DA AVENIDA CANADÁ 2	88
FIGURA 38 – HISTOGRAMA DA AVENIDA BATEL	88

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	–	DOCUMENTAÇÃO DO GRUPO DE TRABALHO 11/3	31
TABELA 2	–	MODELOS DE PROPAGAÇÃO DA ITU	54
TABELA 3	–	PARÂMETROS DO SINAL USADO NAS MEDIÇÕES	57
TABELA 4	–	ESPECIFICAÇÕES DO ANALISADOR DE TV R&S ETL	58
TABELA 5	–	DELIMITAÇÃO DOS TRECHOS POR REGIÃO	62
TABELA 6	–	RESULTADOS POR REGIÃO	77
TABELA 7	–	MODELOS DO <i>SOFTWARE</i> EDX PARA A AV. CANADÁ	78

LISTA DE SIGLAS

8-VSB	<i>8 level - vestigial side band</i>
AAC	<i>advanced audio coding</i>
AGC	<i>automatic gain control</i>
AM	<i>amplitude modulation</i>
ATSC	<i>Advanced Television Systems Committee</i>
AWGN	<i>aditive white Gaussian noise</i>
BBC	<i>British Broadcasting Company</i>
BER	<i>bit error rate</i>
BST	<i>band segmented transmission</i>
C/(N+I)	<i>carrier to noise-plus-interference ratio</i>
C/N	<i>carrier to noise ratio</i>
CCIR	<i>Comité consultatif international pour la radio</i>
COFDM	<i>coded orthogonal frequency division multiplexing</i>
CRR	<i>correct reception rates</i>
dBd	<i>dB em relação a um dipolo de meia-onda</i>
dBmW	<i>dB em relação a 1 miliwatt</i>
DC	<i>direct current</i>
DSL	<i>digital subscriber line</i>
DTTB	<i>Digital Terrestrial Television Broadcasting</i>
DVB-T	<i>digital video broadcasting-Terrestrial</i>
DVD	<i>digital video disk</i>
EIRP	<i>potência efetivamente irradiada isotropicamente</i>
EPG	<i>electronic program guide</i>
FCC	<i>Federal Communications Commission</i>

FM	<i>frequency modulation</i>
GPS	<i>global positioning system</i>
H.264	<i>standard for video compression ISO/IEC 14496-10 - MPEG-4 Part 10, Advanced Video Coding</i>
HD	<i>high definition</i>
HE	<i>high efficiency</i>
IC	<i>integrated circuit</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IPTV	<i>internet protocol television</i>
ISDB-T	<i>Integrated services digital broadcasting-Terrestrial</i>
ISDB-T _B	<i>integrated services digital broadcasting-Terrestrial-version B</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
ITU	<i>International Telecommunications Union</i>
ITU-R	<i>Radiocommunication Sector of ITU</i>
LD	<i>low definition</i>
LFE	<i>low frequency enhancement</i>
LSI	<i>large scale integration</i>
MER	<i>modulation error rate</i>
MP@HL	<i>Main Profile at High Level</i>
MP@ML	<i>Main Profile at Main Level</i>
MPEG	<i>Moving Picture Experts Group</i>
MRC	<i>maximal ratio combining</i>
MUSICAM	<i>Masking Pattern Universal Sub-band Integrated Coding and Multiplexing</i>
NTSC	<i>National Television System Committee</i>
OFDM	<i>orthogonal frequency division multiplexing</i>
One-Seg	<i>one segment</i>
ONU	<i>Organisation des Nations Unies</i>

PAL	<i>phase alternating line</i>
QEF	<i>quasi error free</i>
QPSK	<i>quaternary phase shift keying</i>
RF	<i>radio frequency</i>
RMD	<i>reflection plus multiple diffraction</i>
SBR	<i>spectral band replication</i>
SBTVD	<i>sistema brasileiro de TV digital</i>
SD	<i>standard definition</i>
SECAM	<i>sequential couleur avec memoire</i>
SFN	<i>single frequency network</i>
SMPTE	<i>Society of Motion Picture and Television Engineers</i>
TV	<i>television</i>
UHF	<i>ultra high frequency</i>
UIT	<i>Union Internationale des Télécommunications</i>
VHF	<i>very high frequency</i>
VoD	<i>video-on-demand</i>
WBU	<i>World Broadcasting Union</i>
WiMAX	<i>worldwide interoperability for microwave access</i>
XPD	<i>cross-polarization discrimination factor</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

μs	microssegundo
dB	decibel
λ	comprimento de onda
$E(50, 50)$	campo elétrico excedido em 50% das localidades e em 50% do tempo
$Q_i(x)$	distribuição cumulativa normal complementar inversa
σ_L	desvio-padrão
$E(50, 10)$	campo elétrico excedido em 50% das localidades e em 10% do tempo
$E(50, 1)$	campo elétrico excedido em 50% das localidades e em 1% do tempo
I	incerteza metrológica
I_i	incerteza metrológica do instrumento de medição
$t_{2\sigma}$	valor crítico t de Student (Gosset)
s	desvio-padrão da amostra
$P(50, 50)$	valor de potência recebida excedido em 50% das localidades e em 50% do tempo
$P(90, 50)$	valor de potência recebida excedido em 90% das localidades e em 50% do tempo
T_D	retardo médio dos sinais com multipercurso
S	espalhamento <i>rms</i> dos retardos dos sinais com multipercurso
N	número de versões multipercurso consideradas
P_i	potência da <i>i-ésima</i> versão multipercurso
t_i	retardo da <i>i-ésima</i> versão multipercurso

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 PENETRAÇÃO E IMPORTÂNCIA SOCIAL DA TELEVISÃO NO BRASIL	16
1.2 HISTÓRICO DA CONCEPÇÃO DO SISTEMA DE TV DIGITAL	17
1.2.1 O grupo de trabalho 11/3	17
1.2.2 O modelo consensual para o DTTB	19
1.2.3 Resultados do trabalho de normatização	21
1.3 O SISTEMA DE TV DIGITAL ADOTADO NO BRASIL	26
1.3.1 Serviços no ISDB-T	27
2 CONTEXTO E OBJETIVOS	32
2.1 COMPARAÇÃO COM A TV ANALÓGICA	32
2.2 RECEPÇÃO <i>INDOOR</i>	37
2.3 RECEPÇÃO PORTÁTIL E MÓVEL	37
2.4 COMPETIÇÃO COM OUTRAS ALTERNATIVAS	38
2.5 CONCEITUAÇÕES	39
2.5.1 Incertezas na predição de propagação	39
2.5.2 Cobertura e Serviço	40
2.6 OBJETIVOS	41
2.6.1 Objetivo geral	41
2.6.2 Objetivos secundários	41
3 ESPECIFICIDADES INERENTES AO CONHECIMENTO DA COBERTURA .	42
3.1 VARIABILIDADE DO MENSURANDO	42
3.2 OS MÉTODOS DE USO CORRENTE	42
3.2.1 Variabilidade das localidades	43
3.2.2 Variabilidade com o tempo	46
3.3 SIMULAR OU MEDIR?	46
3.3.1 Medir é viável	47
3.3.2 Repetibilidade e reprodutibilidade das medições	48
3.4 EFEITOS DA POLARIZAÇÃO	50
3.5 ESCOLHA DO TRAJETO	53
4 MÉTODO	55
4.1 ESCOPO DOS ENSAIOS DE CAMPO	55
4.2 CRITÉRIOS PARA AVALIAR A RECEPÇÃO	55
4.3 INSTRUMENTOS E CONFIGURAÇÕES	56
4.3.1 Sinal de teste	56
4.3.2 Configuração dos instrumentos	57
4.3.3 Procedimentos de medição	57
4.4 INCERTEZAS NA MEDIÇÃO	59
5 ANÁLISE DOS DADOS MEDIDOS	61
5.1 INTENSIDADE DO SINAL MEDIDO	61
5.1.1 Caracterização de regiões	61
5.1.2 Região urbana e urbana densa	62

5.1.3 Região suburbana	65
5.2 MULTIPERCURSO	67
6 RESULTADOS	73
6.1 COMPARAÇÃO COM MODELOS	73
6.2 COBERTURA	74
6.3 ASPECTOS PRÁTICOS	74
7 CONCLUSÕES	79
7.1 VIABILIDADE DO MÉTODO	79
7.2 DETERMINAÇÃO DA COBERTURA REAL	79
7.3 COERÊNCIA DOS MODELOS	79
7.4 A CONFIGURAÇÃO DO ESQUEMA DE MODULAÇÃO	80
7.5 LIMITAÇÕES	80
7.6 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	80
REFERÊNCIAS	82
APÊNDICE A – HISTOGRAMAS ADICIONAIS	86

1 INTRODUÇÃO

Seria redundante reafirmar aspectos da televisão como formadora de opinião, fonte de informação, influência poderosa tanto na formação de crianças quanto no desenrolar da política. Além de sua destacada capilaridade, para a maioria dos lares brasileiros a televisão é praticamente a única ‘janela para o mundo’.

O Brasil vivencia uma passagem da TV analógica para a digital. Como toda transição, esta também se faz acompanhar por dúvidas e incertezas, elas próprias estímulos para novas investigações. Neste capítulo introdutório, aspectos sociais e históricos da televisão e do sistema adotado em nosso país serão abordados, na tentativa de compor um cenário para circunstanciar a pesquisa.

1.1 PENETRAÇÃO E IMPORTÂNCIA SOCIAL DA TELEVISÃO NO BRASIL

Mais de 94,6% dos lares brasileiros têm pelo menos um aparelho de televisão (FARIAS et al., 2008). Isso significa que estão ativos mais de 80 milhões de receptores. Indo além de fornecer entretenimento e cultura gratuitamente, a teledifusão terrestre aberta atua como um fator fundamental de unificação em um país com as dimensões do Brasil. O porte do país, aliado à ampla penetração do sistema televisivo, faz com que a adoção de um novo padrão avulte tecnológica e economicamente. A troca para o sistema digital no maior mercado sul-americano tem um impacto fiscal esperado de 100 bilhões de dólares norte-americanos (FARIAS et al., 2008). O denominado SBTVD (*Sistema brasileiro de TV digital*) (BRASIL, 2003) iniciou suas transmissões em dezembro de 2007, em São Paulo (MEGRICH, 2009). Nove países da América Latina perceberam as vantagens que o sistema adotado no Brasil apresenta, e confirmaram sua adoção (Peru, Argentina, Chile, Venezuela, Equador, Costa Rica, Paraguai, Bolívia e Uruguai) (DIBEG, 2011). Isso amplia ainda mais a escala econômica, e consolida um padrão regional com a melhor tecnologia individual correntemente conhecida para codificação de vídeo e de áudio, transporte e codificação de canal, e modulação.

Em nível internacional, o receptor de TV é certamente o aparelho eletrônico doméstico

mais popular. A UIT (*União Internacional de Telecomunicações*) divulgou no final de 2000 a estimativa de que existiam 1,4 bilhão de receptores de TV no mundo. A cifra supera os telefones fixos (0,787 bilhão), celulares (0,75 bilhão) e computadores pessoais (0,277 bilhão). A substituição desses aparelhos analógicos por digitais durante os próximos anos cria um negócio multi-bilionário para os fabricantes de eletrônica de consumo e para a indústria de semicondutores (WU et al., 2006).

A modalidade terrestre da TV digital tem algumas vantagens sobre a opção por satélite ou por cabo: permite a recepção móvel e a difusão de programas locais.

Validar ferramentas para conhecer a real cobertura desse novo sistema, informação de interesse primordial tanto para o *broadcaster* quanto para os órgãos que administram o uso do espectro eletromagnético, motivou a realização deste trabalho.

1.2 HISTÓRICO DA CONCEPÇÃO DO SISTEMA DE TV DIGITAL

Conhecer alguns aspectos históricos relativos à tecnologia estudada facilita e sedimenta o seu entendimento, porque empresta um encadeamento aos fatos. O pequeno resumo apresentado nesta seção baseia-se em (BARON, 2010). Seu autor presidiu o grupo de trabalho do ITU-R (*Setor de Radiocomunicações da ITU*) que concebeu as bases do sistema digital de teledifusão terrestre (DTTB).

1.2.1 O GRUPO DE TRABALHO 11/3

Está atribuída à ITU (*International Telecommunications Union*), uma agência especial da ONU (*Organização das Nações Unidas*), a responsabilidade de promover acordos internacionais a respeito de comunicações com e sem-fio. A ITU desenvolve recomendações que visam à harmonização e ao desenvolvimento do campo das telecomunicações naquilo que é aplicável à comunidade internacional.

A responsabilidade mais específica sobre os serviços de difusão de sons e imagens esteve originalmente atribuída ao CCIR (*Comitê Consultivo Internacional para Rádio*), criado em 1927 e reorganizado como ITU-R em 1993. Por solicitação de países membros, em 1992 o ITU-R criou o grupo de trabalho 11/3, incumbido de desenvolver Recomendações (nome que a ITU atribui às suas normas) para serviços avançados de teledifusão. Essa tarefa foi concluída em 1996, quando foi estabelecido acordo sobre um sistema completo de teledifusão terrestre (DTTB), igualmente aplicável a ambientes de 50 e de 60Hz, não importando se os canais utilizados tivessem largura de faixa de 6, 7 ou de 8MHz. O novo sistema DTTB era compatível

com as variantes existentes nos sistemas analógicos já implantados internacionalmente.

Em essência, os objetivos do esforço eram:

- definir um sistema *completamente digital* capaz de maior resolução de imagem, som *surround*, e que empregasse uma tecnologia aperfeiçoada de difusão digital, com uso mais eficiente do espectro do que os serviços analógicos vigentes;
- definir as tecnologias a serem aplicadas, e
- promover acordo sobre os valores a adotar para um conjunto de parâmetros do sistema.

No desenrolar do trabalho de concepção de um padrão único e mundial de TV digital, quatro áreas foram estabelecidas para serem exploradas pelo grupo de trabalho que concebia o DTTB:

1. codificação de fonte e compressão;
2. multiplexação e transporte do serviço;
3. camada física e sistema de modulação; e
4. fatores de planejamento e implantação.

A tarefa cujo planejamento exigiu mais tempo foi a escolha do esquema de modulação porque, à época, as técnicas de modulação em análise ainda não estavam comprovadas. Do ponto de vista do consumidor, o custo de acesso a um novo sistema diminui com o aumento no volume de unidades produzidas; definir um sistema com um número *limitado* de características, que aumentassem sua probabilidade de aceitação global, contribuiria para essa diminuição de custo. Já existia o padrão MPEG - 2, desenvolvido para aplicações em televisão, nas quais havia as limitações de canal e de meios de gravação, e exigiam um eficiente mecanismo de transporte. Com base no trabalho já feito, e na filosofia do padrão MPEG - 2, o grupo de trabalho produziu Recomendações que permitiriam um sistema DTTB que poderia ser aplicado em 50 ou 60 Hz, canais de 6, 7 ou 8 MHz, e tornaria possível o intercâmbio internacional de programas televisivos. Para atingir essas metas, deveria haver um conjunto mínimo de elementos básicos para definir o sistema DTTB:

1. capacidade para um serviço único em HD (*alta definição*) ou para diversos serviços de qualidade convencional;
2. uma sintaxe comum e multinível, para vídeo e para áudio;

3. codificação de fontes de *vídeo* em conformidade com o padrão MPEG - 2 no perfil principal/nível principal ou mais elevado;
4. codificação de fontes de *áudio* em conformidade ou com o padrão MPEG - 2 nível II ou com os padrões AC-3, com uso de um conjunto único de circuitos integrados (IC), capazes de decodificar tanto MPEG - 2 nível II quanto codificação de áudio AC-3;
5. um padrão comum para multiplexar programação, no qual a multiplexação do serviço e seu transporte se adequem ao padrão MPEG - 2, e usem um sistema comum de *Service information* e de *Header descriptor*, com um padrão comum para identificação.
6. um padrão comum de gravação, que permita o intercâmbio de programação para cada um dos níveis de compressão utilizados;
7. um padrão comum para as interfaces mecânica e elétrica no nível de fluxo de dados; e
8. esquemas de modulação e de codificação de canal que usem 8-VSB onde sistemas de portadora única são apropriados, ou COFDM onde portadoras múltiplas for mais apropriado.

1.2.2 O MODELO CONSENSUAL PARA O DTTB

O consenso estabelecido no grupo de trabalho 11/3, e sintetizado pelos elementos básicos acima enumerados, permitiu a concepção de um *modelo* para o sistema DTTB, que veio a servir de base para as investigações e para a posterior elaboração dos Relatórios e das Recomendações, isto é, do arcabouço normativo. A figura 1 orienta as considerações que se seguem.

Na figura, quatro subsistemas estão representados.

1. codificação de fonte e compressão;
2. multiplexação e transporte;
3. camada física, com os parâmetros de codificação para o canal e com o esquema de modulação;
4. fatores de planejamento, que consideram os ambientes de transmissão e os receptores, e as estratégias de implantação.

Codificação de fonte refere-se a métodos de *reduzir a taxa de bits* criada ao se representar imagens por uma sequência de ‘elementos de imagem’ ou *pixels*, ou ao se representar som por amostras de áudio. Essa codificação pode abranger os assim chamados ‘dados auxiliares’, os

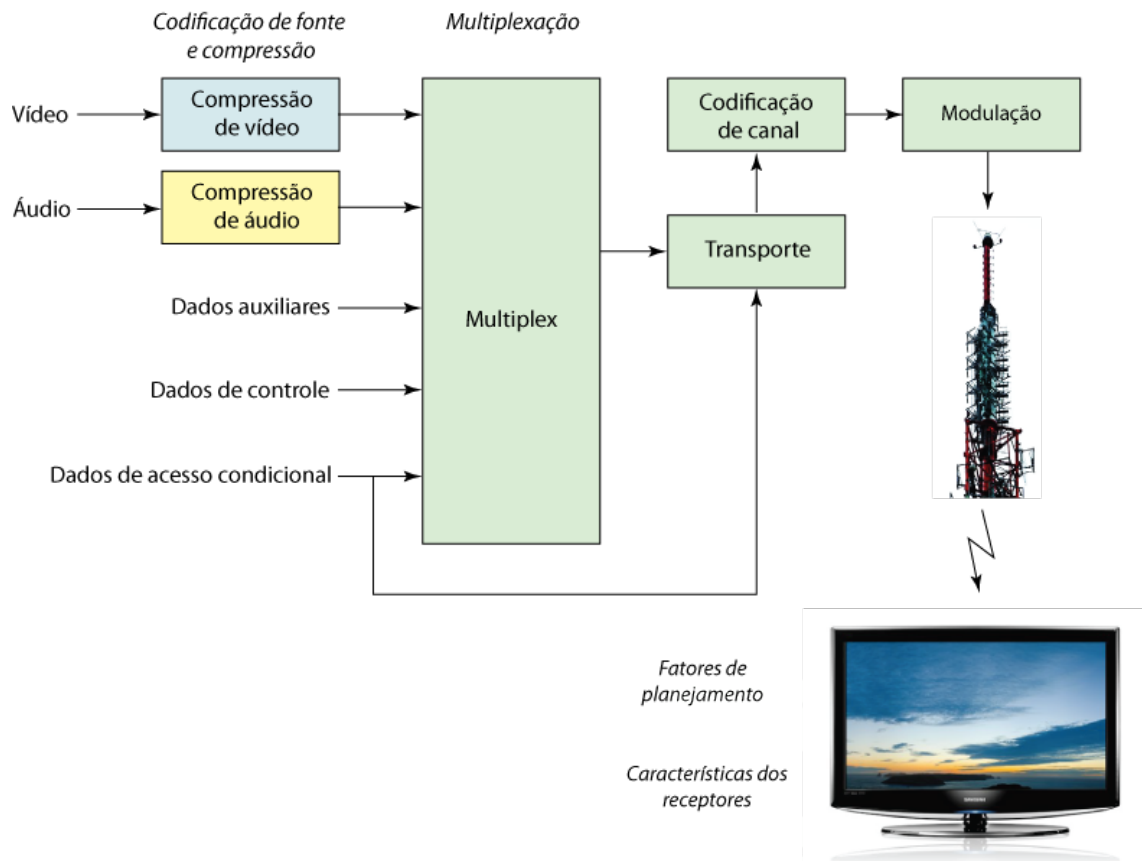


Figura 1: Modelo concebido pelo grupo de trabalho 11/3 para o sistema DTTB.

Fonte: (BARON, 2010)

quais incluem dados de controle para sistema, dados de controle para acesso condicional, ou outros, como *closed captioning*. Essa redução na taxa de bits deve permitir a representação, no destino, da fonte original, sem degradação inaceitável, ou mesmo perceptível.

Multiplexação e transporte é o módulo que divide o fluxo de dados em pacotes identificáveis de forma única, e providencia que os dados de vídeo, de áudio e de dados auxiliares formem um fluxo de bits único. A multiplexação também permite combinar os fluxos de programações diferentes em um único canal, o que permite que sejam difundidos simultaneamente. O mecanismo de transporte permite intercâmbio de programação entre os sistemas terrestre, a cabo, via satélite, meios de gravação e interfaces de computador.

A *camada física* abrange a codificação para o canal e o esquema de modulação. O codificador para o canal acrescenta bits redundantes ao fluxo de bits já comprimido e multiplexado. Essa redundância tem por objetivo permitir que o receptor reconstrua o sinal da fonte, mesmo que haja perdas parciais decorrentes da transmissão ou da gravação. O codificador para o canal deve se adequar ao esquema de modulação adotado e ao meio através do qual os dados trafegarão. Modulação é o mecanismo que imprime os dados já com redundância a uma ou a várias

portadoras, para serem transmitidos. Por isso, os sistemas de transmissão são conhecidos como ‘de portadora única’, ou ‘de portadoras múltiplas’.

Fatores de planejamento e estratégias de implantação consideram as características do meio de transmissão e as dos receptores, tendo em vista a introdução do sistema digital em um ambiente onde já existem outros serviços de teledifusão em funcionamento.

1.2.3 RESULTADOS DO TRABALHO DE NORMATIZAÇÃO

Em 1996 completou-se a tarefa de definir um sistema DTTB único. Um conjunto normativo foi concluído, e está detalhado na tabela 1 ao final deste capítulo.

O sistema DTTB ficou dividido em dois subconjuntos: o Sistema A (ATSC), para ser usado em ambientes de 60Hz e canais de 6MHz, e o Sistema B (DVB), para os ambientes de 50Hz e canais de 7 e de 8MHz. As diferenças entre os dois subconjuntos foram minimizadas e harmonizadas no que tange aos níveis de transporte e de codificação de vídeo e de áudio, de forma a não haver conflitos, e de ser possível o uso de decodificadores únicos *plug and play*.

As normas da tabela 1 definem um sistema completo para DTTB, com os aspectos que seguem. Para a codificação de *vídeo* (codificação de fonte), foi modificado o padrão MPEG-2; seus mais de vinte perfis e níveis de codificação foram reduzidos a apenas dois: o denominado MP@ML (*perfil principal no nível principal*), que define receptores para SD (*definição padrão*) apenas, e o chamado MP@HL (*perfil principal no nível alto*), definidor de receptores capazes de decodificar tanto serviços de HD quanto de SD. O pequeno número de perfis e níveis diminui os custos tanto dos receptores quanto da geração de programação. A existência de decodificadores únicos, capazes de decodificar todo o conjunto definido na ITU-R Rec.BT.1208 atende plenamente ao requisito da WBU (*World Broadcasting Union*) que visa a sistemas de difusão únicos e globais, que conduzam a receptores também únicos e universais.

Foi mais controversa a seleção do sistema de codificação de fonte para o *áudio*. Entre os dois principais candidatos, o europeu MUSICAM (*Masking Pattern Universal Sub-band Integrated Coding and Multiplexing*) (ISO/IEC, 1993) (MACKENZIE, 2004) era parte das especificações MPEG-2, e compatível com sistemas já existentes. O norte-americano Dolby AC-3 (ATSC, 1994) era mais eficiente em taxa de bits, e já havia sido adotado em cinema e em DVD (*digital video disk*). Ambos os sistemas já estavam aplicados, e com ampla aceitação. Diálogo com os fabricantes de decodificadores evidenciou que o custo do receptor aumentaria menos de 0,25% caso ele fosse preparado para decodificar os dois sistemas, em vez de apenas um deles, e essa foi a opção adotada. A existência de decodificadores únicos, capazes de decodificar todo

o conjunto definido na ITU-R Rec. BS.1196 atende plenamente ao requisito da WBU que visa a sistemas de difusão únicos e globais, que conduzam a receptores também únicos e universais.

Os mecanismos de compressão de áudio para TV digital produzem fluxos de bits desde 32kbits/s (voz) até 384 kbits/s (seis canais, 5.1). Nesta última modalidade, além dos dois canais *stereo* (L e R), há um canal central (C), dois canais *surround* (LS e RS), e ainda um canal de reforço de graves LFE (*low frequency enhancement*) entre 20 e 120Hz, às vezes denominado *subwoofer*, (o '.1' na notação '5.1'), representados na figura 2.

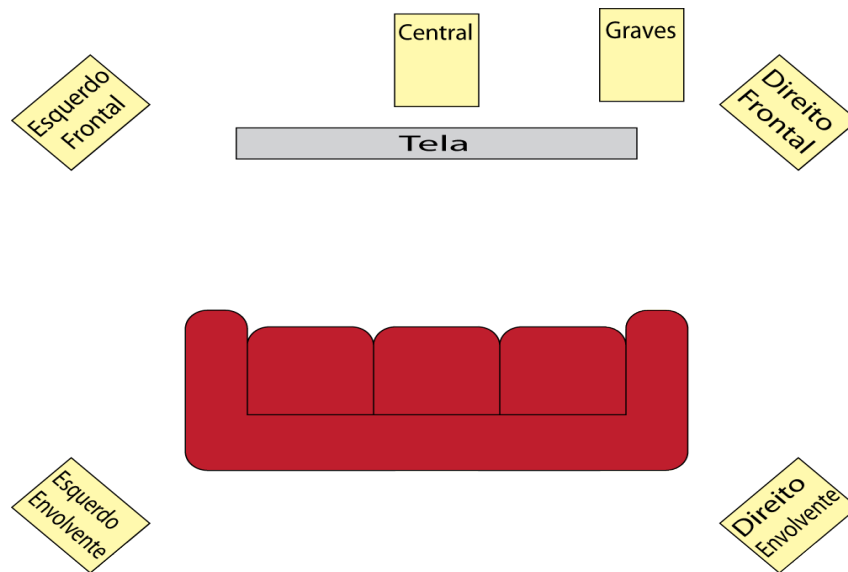


Figura 2: Sonorização envolvente (Surround 5.1).

A *multiplexação* de serviço e o *transporte* fornecem as fundações ao sistema DTTB. Formam um subconjunto das ferramentas definidas no padrão MPEG-2, conforme descritas na ITU Rec.BT.1299. A identificação de pacotes, recomendada para os sistemas A e B foi harmonizada, a fim de evitar erros na decodificação. A existência de decodificadores únicos que consigam decodificar o conjunto inteiro de ferramentas descritas na ITU Rec.BT.1299 permite desenvolver equipamentos que, mesmo sendo únicos, decodificam o conjunto inteiro de ferramentas definidas na norma ITU Rec.BT.1299, o que vem ao encontro do requisito da WBU que visa a sistemas de difusão únicos e globais, que conduzam a equipamentos ‘plug and play’ também únicos e universais para os consumidores, sem necessidade de considerar o subconjunto específico efetivamente utilizado. Como o MPEG-2 havia sido desenvolvido originalmente para *armazenamento*, algumas modificações de pequena monta tiveram que ser incorporadas ao padrão original, para uso em *difusão*, não antes da necessária aceitação por parte do comitê MPEG.

No que concerne à *camada física*, a padronização do sistema de modulação foi obstaculizada pela falta de uniformidade no uso do espectro internacionalmente. Países que adotaram o

sistema NTSC organizaram seus planos de frequência com canais de 6MHz de largura de faixa. Países que adotaram sistemas PAL e SECAM planejaram canais de 6 a 8MHz. Dessa forma, a capacidade em bits/s variaria geograficamente.

Um outro aspecto é que alguns países, como Austrália, Canadá e Estados Unidos desenvolveram ambientes em que uma ou mais redes de teledifusão produziam e distribuíam programação em escala nacional, mas era permitido aos teledifusores locais encarregados de distribuí-las inserir programação *gerada localmente*, como comerciais e noticiários de interesse local. Em contraponto, outras nações desenvolveram sistemas de teledifusão com caráter efetivamente nacional. Uma ou mais redes de teledifusão produziam e distribuíam programação em escala nacional, redistribuída pelos teledifusores locais *sem qualquer modificação*. Nesse ambiente, um uso mais eficiente do espectro seria com SFN (*rede em frequência única*), insensível a reflexões e com receptores que respondessem ao sinal SFN localmente mais forte. Perante essa diversidade de ambientes, não houve consenso em torno de um sistema único de modulação. Duas opções foram documentadas: COFDM (*multiplexação por divisão em frequências ortogonais, codificada*) e 8-VSB (*8 níveis em faixa lateral vestigial*).

COFDM era menos suscetível a interferências, e possibilitaria redes nacionais em frequência única. 8 - VSB era ligeiramente mais eficiente (mais bits/s por MHz), e projetado para uso em ambientes de 6MHz, com inserção de programação local. COFDM foi a opção para o Sistema B (DVB), e 8-VSB foi adotado para o Sistema A (ATSC) pela FCC (*Federal Communications Commission*), contrariando proposta de um grupo de teledifusores dos Estados Unidos e do Canadá, que propunham adotar COFDM. As figuras 3 e 4 a seguir ilustram os dois esquemas de modulação no domínio da frequência.

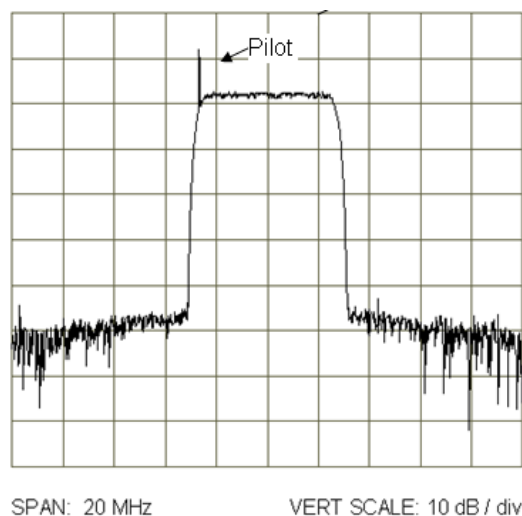


Figura 3: Espectro de um sinal 8-VSB.

Fonte: (ADAMIAN, 2010)

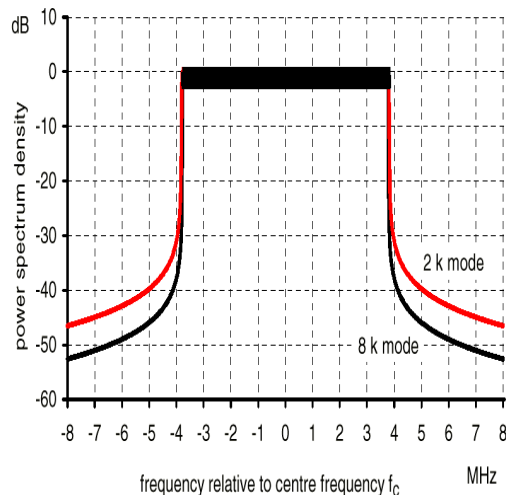


Figura 4: *Espectro de um sinal COFDM.*

Fonte: ETSI EN 300 744 V1.3.1(2000-08)

A normatização referente à camada física do sistema DTTB (esquema de modulação e codificação para o canal) está na Rec. BT.1305, e leva em consideração a existência de canais de 6, 7 e 8MHz já alocados. A tecnologia de compressão de sinais digitais aplicada à codificação de sinais de TV, combinada com a identificação de pacotes, permite a transmissão de *múltiplos programas* em um único canal já alocado, ou programação em alta definição, sempre acompanhada de som de alta qualidade, informação para acesso condicional e canais de dados auxiliares. Essa capacidade de transmitir múltiplos programas permite também serviços de televisão estereoscópica, seja no sistema terrestre, satelital, ou a cabo. O intercâmbio de conteúdo entre esses três sistemas recebeu especial atenção. Um método de codificação de fonte unificado e comum aos três, tanto para vídeo quanto para áudio, aliado a um método de transporte e multiplexação igualmente unificado e comum a todos proporciona uma harmonização entre os três sistemas. Os dois subconjuntos definidos, o Sistema A (ATSC) e o Sistema B (DVB), são compatíveis a ponto de permitir que um decodificador único possa extrair qualquer dos dois sistemas a partir do fluxo de dados. A esse fluxo são acrescentados um mecanismo de proteção contra erros, uma estrutura de emolduramento e um esquema de modulação apropriados ao meio de distribuição. Dessa concepção, decorre um fluxo de dados sempre com a mesma formatação à saída do demodulador, não importa qual sistema tenha sido usado na transmissão. Isso torna menos complexo o equipamento do consumidor.

No que concerne a HDTV, entre os diversos padrões em uso, o consenso se deu em torno de um padrão de 1080 linhas operável em 50 e 60Hz, que fosse compatível com filmes de 24 quadros por segundo.

A figura 5 ilustra o surgimento da tela com proporção 16:9. O formato de tela 4:3 da TV

analógica convencional foi adotada a partir do cinema da década de 1930. Em 1984, a indústria cinematográfica de Hollywood solicitou formalmente à SMPTE (*Society of Motion Picture and Television Engineers*) que trabalhasse em uma norma para a produção eletrônica de filmes, recurso com uso cada vez mais frequente para a geração de efeitos especiais e animação. O custo de uma tecnologia depende de seu volume de produção, e o volume produzido é estimulado pela padronização. Portanto, acreditava-se importante a criação de uma norma. Por décadas, a indústria de filmes usou muitas proporções de tela diferentes, mas a produção eletrônica provavelmente se restringiria a uma única proporção. O problema se reduzia a encontrar qual proporção seria a mais adequada.

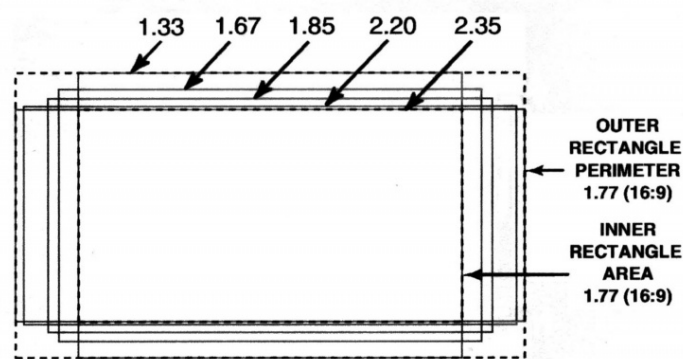


Figura 5: Surgimento da proporção de tela 16:9

Fonte: (BARON, 2010)

Ao estudar a questão, o Dr. Kerns Powers do Laboratório Sarnoff desenhou retângulos com todas as proporções encontradas nos formatos de filmes mais populares. Ao sobrepor-los, percebeu que todos caíam dentro de um retângulo com proporção 1,77:1. E mais, todos caíam fora de outro retângulo menor, também de proporção 1,77:1, conforme a figura 5. Consequentemente, um filme produzido eletronicamente com proporção 1,77:1 poderia ser lançado em qualquer das outras proporções mais usadas. Powers apresentou seus resultados à SMPTE, e a comunidade internacional adotou a proporção 16:9 (1,78:1) para a produção eletrônica de filmes. O grupo que trabalhava no DTTB percebeu que essa proporção de tela seria o formato mais eficiente para o novo serviço, e substituiu a proposta japonesa anterior de 5:3 pela de 16:9 (5,333:3), proporção que veio a se incorporar às normas da ITU para serviços de HDTV.

O grupo de trabalho 11/3, sendo um comitê com duração predeterminada, e constituído para um fim específico, encerrou seus trabalhos em novembro de 1996. Produziu um conjunto de Recomendações (tabela 1) que permitiram um sistema de TV digital que, mesmo nos canais mais estreitos de 6MHz, poderia enviar a cada receptor um fluxo de 19,3Mbits/s. Nele poderiam ser transportados um serviço de HDTV com som *surround* e seus dados auxiliares, ou

serviços múltiplos de TV em definição *standard*, que poderiam incluir serviços educacionais, ou *download* de textos ou imagens estáticas, ou ainda outros serviços e informações.

1.3 O SISTEMA DE TV DIGITAL ADOTADO NO BRASIL

O sistema de TV digital terrestre adotado pelo Brasil e por nove outros países da América do Sul e Central (DIBEG, 2011) teve seu arcabouço principal desenvolvido no Japão, denominado ISDB-T (*Integrated services digital broadcasting-Terrestrial*) (DIBEG, 2011). O padrão japonês foi desenvolvido após o sistema norte-americano ATSC (*Advanced Television Systems Committee*) (ATSC, 2007), que opera com portadora única. O sistema nipônico usa múltiplas portadoras, como o sistema europeu DVB-T (*Digital video broadcasting-Terrestrial*). Como foi desenvolvido após tanto o ATSC norte-americano quanto o DVB europeu, incorporou aperfeiçoamentos não disponíveis nos dois anteriores. O Brasil adotou o sistema japonês com, entre outras, as modificações a seguir (FARIAS et al., 2008):

- o padrão de codificação de vídeo mais avançado H.264 (*standard for video compression ISO/IEC 14496-10 - MPEG-4 Part 10, Advanced Video Coding*) (ABNT, 2007b), diferentemente do padrão MPEG-2 utilizado nos padrões norte-americano (ATSC) (ATSC, 2007), no europeu (DVB-T), e mesmo no próprio japonês (ISDB-T) (ARIB, 2009);
- o padrão de codificação de áudio multicanal 5.1 MPEG-4 HE- AAC v1@L4 (High Efficiency AAC, Version 1, Level 4)
- o *middleware* Ginga, especificamente projetado para o padrão adotado no Brasil (ABNT, 2011a) (ABNT, 2011b) (ABNT, 2010).

O padrão adotado no Brasil foi originalmente denominado *SBTVD* (sistema brasileiro de TV digital) (BRASIL, 2003). Após a opção pelo padrão japonês, passou a ser referenciado como ISDB-T_B (*teledifusão digital de serviços integrados-versão B*) (AKAMINE et al., 2010). Suas transmissões iniciaram-se em 21/12/2007 em São Paulo. A cada difusor foi alocado um canal de 6MHz na faixa de *VHF/UHF*, e os usuários recebem o sinal de TV gratuitamente. O planejamento de implantação previu que as capitais estaduais estivessem cobertas ao final de 2009, e o restante das cidades brasileiras atendidas até o final de 2013. Durante esse período, os sinais digitais serão transmitidos juntamente com os analógicos já existentes, uma operação denominada *simulcasting*. A figura 6 representa os municípios do Paraná já atendidos por TV digital em abril de 2011, segundo a Anatel.

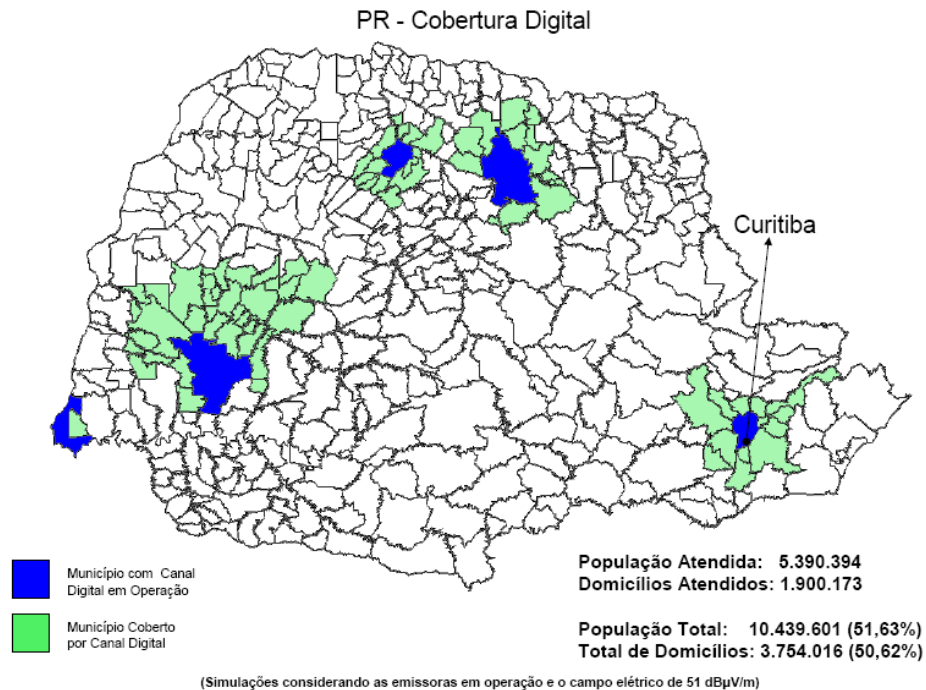


Figura 6: *Municípios paranaenses cobertos por TV digital em abril de 2011.*

Fonte: Anatel

1.3.1 SERVIÇOS NO ISDB-T

O sistema ISDB-T disponibiliza os serviços seguintes (DIBEG, 2011):

- HDTV;
- programação multicanal;
- EPG (guia eletrônico de programação);
- teledifusão de dados;
- TV interativa;
- recepção móvel;
- serviço One-Seg (LD em um segmento);
- outros.

HDTV pode ser considerada a característica mais importante disponível no ISDB-T. Proporciona 1080 linhas efetivas de varredura, com razão de aspecto 16:9. É acompanhada por som *surround*, 5+1 canais com qualidade de áudio equivalente a CD.

A programação multicanal se refere à possibilidade técnica de, em um mesmo canal, poder trafegar um programa em alta definição *ou* dois ou três programas em definição *standard*. Abre a possibilidade de, por exemplo, manter a programação normal em seu horário previsto, mesmo que um evento televisionado ao vivo (esporte, show, eleição) não termine no horário planejado. No Brasil, existe uma interpretação de que a concessão é para ‘teledifusão’; não importa se estão dentro do mesmo canal, dois programas podem ser considerados como dois serviços de teledifusão. Não poderiam portanto ser difundidos dentro da mesma concessão, exceção reservada aos canais consignados a órgãos e entidade integrantes dos poderes *da União* (BRASIL, 2009).

Um guia eletrônico de programação é uma tabela de programas, canais e horários que pode ser exibida na tela se acionada pelo controle remoto do receptor. Pode conter a programação do dia e da semana seguinte, com resumos ou comentários sobre cada programa, o que permite agendar sua gravação.

O acesso à teledifusão de dados se dá por meio de um botão específico no controle remoto. As informações disponíveis podem ser previsão do tempo, notícias locais ou informações relacionadas a programas em andamento. Podem conter informações sobre o trânsito, catástrofes, eventos, comerciais, espetáculos em cartaz, recomendações, notícias locais, resultados parciais de eventos esportivos, programas em andamento, opções de votação em programas interativos, etc., desde que estabelecido um canal de retorno.

Para o funcionamento de TV interativa precisa existir um canal de retorno (via internet ou sistema telefônico). Permite a participação do telespectador em programas interativos, aquisição de bens exibidos no programa corrente, por exemplo, que permanece visível na tela, em tamanho menor.

A recepção móvel é o grande diferencial do sistema de televisão digital terrestre. Libera o usuário dos cabos e das antenas satelitais. Permite acompanhar a programação durante o deslocamento em veículos coletivos ou individuais. Embora seja uma possibilidade atraente, não é simples atender à expectativa. Comparada à recepção fixa, a mobilidade traz um aumento nos sinais de multipercurso, um desvanecimento mais severo, agravado pelo uso de antenas receptoras de menor ganho e diretividade, montadas em alturas menores. Esses aspectos dificultam muito receber HDTV em um ônibus ou carro em movimento. Com o objetivo de melhorar a recepção móvel, principalmente em ambiente urbano, o ISDB-T usa entrelaçamento temporal programável até $400\mu\text{s}$, recurso não disponível em ATSC ou DVB-T (DIBEG, 2010). Aleatoriza a posição temporal de símbolos, de modo que um desvanecimento profundo ou um pulso de ruído, que arruinariam uma sequência de símbolos adjacentes, passam a tornar errôneos sím-

bolos não contíguos no tempo. Isso permite que sejam corrigidos pelos processos de correção de erros. Para interrupções com duração superior a cerca de $200 \mu\text{s}$, o desempenho do ISDB-T supera por aproximadamente 7 dB os sistemas ATSC e DVB-T, graças ao entrelaçamento temporal, conforme a figura 7 (DIBEG, 2010).

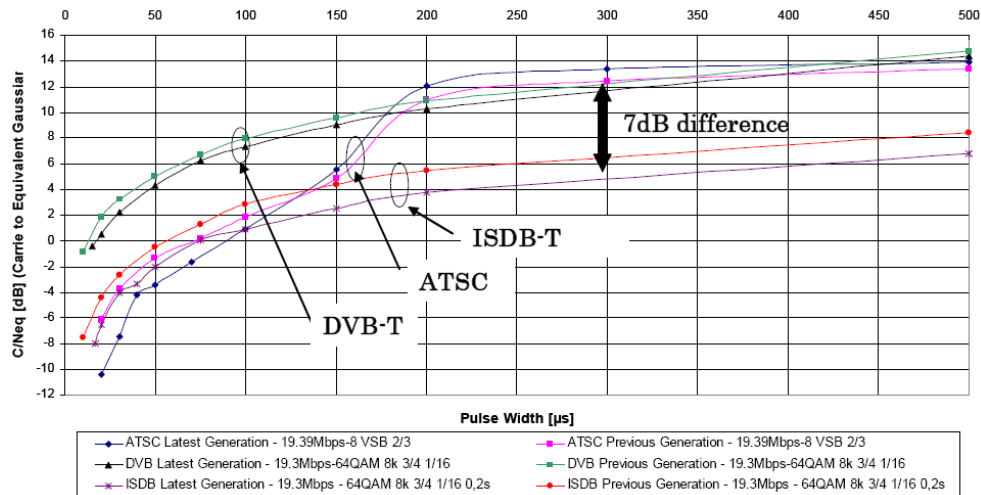


Figura 7: Comparação entre as suscetibilidades ao ruído impulsivo de três sistemas de TV digital.

Fonte: (DIBEG, 2010)

Uma outra providência que pode ser adotada para melhorar a recepção móvel é a recepção em diversidade espacial. Fundamenta-se no fato de que várias antenas receptoras, separadas espacialmente por alguns comprimentos de onda λ do sinal recebido, captam sinais cujas amplitudes e fases não são correlacionadas entre si. Torna-se menos provável que todas as antenas receptoras se encontrem, ao mesmo tempo, em região de desvanecimento profundo. Após demodulação por vias independentes de recepção (uma para cada antena), as subportadoras OFDM são combinadas segundo a técnica MRC: após multiplicadas por um fator de peso proporcional à relação sinal/ruído avaliada em cada via de recepção, são alinhadas em fase e somadas. A relação sinal/ruído à saída será a soma das relações sinal/ruído de cada via (RAPAPORT, 2002). Significa dizer que é possível obter-se uma relação sinal/ruído utilizável, mesmo que em nenhuma das antenas essa condição tenha sido atingida. Diversidade espacial com MRC é especialmente útil contra desvanecimento seletivo em frequência, que deteriora fortemente uma ou algumas subportadoras, condição muito encontrada em ambientes urbanos, e causada em geral por multipercurso.

O sistema ISDB-T pode transmitir um programa em HD e outro (ou o mesmo) destinado a receptores móveis, ao mesmo tempo. Isso é feito por meio da divisão da faixa de frequências do canal em uso em 13 faixas estreitas, denominadas *segmentos*, cada um dos quais abrigando um

conjunto predeterminado de subportadoras. O sistema é denominado BST-OFDM. A transmissão em HD ocupa 12 segmentos, deixando um deles, o central, livre para difundir a receptores móveis. O assim chamado serviço *one-seg* propicia uma imagem com menor definição (LD, 320x240 pixels @ 180-256kbps), áudio AAC- SBR (32-64kbps) e difusão de dados (BML @ 20-80kbps). Tem suas subportadoras moduladas em QPSK, para poderem operar com relações sinal/ruído menores. A faixa estreita necessária à recepção permite projetar receptores com menor consumo de bateria, e mais baratos, como convém à mobilidade e à portabilidade. O serviço *one-seg* também pode ser usado como um canal paralelo de informações a respeito de um programa HD em andamento, como informações a respeito de personagens do programa, receitas, etc. Uma característica importante do serviço *one-seg* é a possibilidade de, na ocorrência de uma catástrofe, os receptores móveis e portáteis poderem ser remotamente ‘acordados’ para veicularem mensagens de alerta de emergência. O serviço *one-seg* só está disponível no ISDB-T; não tem contrapartida em DVB-T ou ATSC.

Outros serviços são possíveis no ISDB-T: legendas para deficientes auditivos (*close-caption*) sem necessidade de adaptadores específicos, redução da velocidade da locução para facilitar a compreensão, e ainda o acompanhamento de um segundo programa em uma área reduzida da tela (DIBEG, 2011).

Tabela 1: Recomendações e relatórios do grupo de trabalho 11/3

<i>Recomendações preliminares, gerados no desenvolvimento dos trabalhos</i>	<i>Documentos finais, aprovados pela ITU</i>
<p>Sistema: Report: "A Guide to DTTB in the VHF/UHF Bands"</p>	<p>Handbook: "DTTB in the VHF/UHF Bands"</p> <p>ITU-R Rec. BT 1298: "The Basic Elements of a Worldwide Family of Common Systems for DTTB"</p>
<p>Video coding and compression: Rec. 11/3-XXA: "Video source coding and compression for DTTB"</p>	<p>ITU-R Rec. BT 1208: "Video coding for DTTB"</p>
<p>Audio coding and compression: Rec. 11/3-XXB: "Audio coding for DTTB"</p>	<p>ITU-R Rec. BT 1196: "Audio coding for DTTB"</p>
<p>Service multiplex and transport: Rec. 11/3-XXE: "Service transport methods for DTTB"</p> <p>Rec. 11/3-XXF: "Service multiplex methods for DTTB"</p> <p>Rec. 11/3-XXC: "Data services for DTTB"</p> <p>Rec. 11/3-XXG: "Access control schemes for DTTB"</p> <p>Rec. 11/3-XXH: "Conditional access systems for DTTB"</p>	<p>ITU-R Rec. BT 1299: "Service multiplex, transport, and identification methods for DTTB"</p> <p>ITU-R Rec. BT 1209: "Service multiplex methods for DTTB"</p> <p>ITU-R Rec. BT 1300: "Data services for DTTB"</p> <p>ITU-R Rec. BT 1207: "Data access methods for DTTB"</p> <p>Included in Rec. BT 1207</p>
<p>Physical layer: Rec. 11/3-XXD: "Error correction for DTTB"</p> <p>Rec. 11/3-XXI: "Modulation and emission methods for DTTB"</p> <p>Rec. 11/3-XXJ: "Spectrum shaping limits for DTTB"</p> <p>Rec. 11/3-XXK: "Performance of DTTB emission equipment"</p> <p>Report: "DTTB service coverage and field trials"</p> <p>Report: "Planning factors and implementation strategy"</p>	<p>ITU-R Rec. BT 1305: "Error correction, data framing, modulation, and emission methods for DTTB"</p> <p>Included in Rec. BT 1305</p> <p>ITU-R Rec. BT 1206: "Spectrum shaping limits for DTTB"</p> <p>Included in the handbook</p> <p>Included in the handbook</p> <p>Included in the handbook</p>

2 CONTEXTO E OBJETIVOS

Para melhor embasar os objetivos do trabalho, convém abordar primeiramente o contexto onde ele se insere. Embora seja alternativa mais popular, a TV digital terrestre aberta não é a única. Algumas considerações a esse respeito são feitas nesse capítulo e, em seguida, são apresentados os objetivos do trabalho.

2.1 COMPARAÇÃO COM A TV ANALÓGICA

A legislação brasileira prevê que a área servida por uma estação de TV digital replique aquela anteriormente coberta por TV analógica (ANATEL, 2005) (BRASIL, 2006). É oportuno portanto traçar um paralelo entre os dois sistemas.

Confrontada com o sistema de TV analógico, a TV digital apresenta algumas particularidades. A resolução da imagem tem possibilidade de atingir 1080 linhas horizontais, bem superior às 485 linhas efetivas de imagem do padrão analógico brasileiro, o PAL, padrão M (MACKENZIE, 2004). A propagação por múltiplos percursos *não* causa o surgimento de duplicatas da imagem (os denominados *fantasmas* no sistema analógico). É prevista uma interatividade na qual, através de um canal de retorno, o telespectador também pode enviar informações à emissora, ainda que em velocidades muito inferiores às do trajeto *downlink*.

Uma característica importante da TV digital é que a degradação da qualidade da imagem, quando ocorre, é brusca; ela não piora gradualmente, como a TV analógica, que costuma apresentar uma imagem progressivamente contaminada com ruído branco (chuvisco), à medida em que o sinal recebido enfraquece. A TV digital mantém sua plena qualidade até o menor nível de sinal necessário a seu funcionamento. A partir desse ponto, cessa a recepção de forma abrupta: a imagem fica ‘congelada’, e ou apresenta aparência de blocos, ou simplesmente desaparece. Essa queda brusca da plena qualidade à ausência total de serviço é denominada ‘efeito precipício’ (*cliff effect*) (SHIOMI; HATORI, 2000) (ITU, 2005) (WECK, 1999). Trata-se de um aspecto importante que distingue a TV digital da analógica. Enquanto com essa última não é incomum que alguns usuários contentem-se em assistir a programação disponível, mesmo em

qualidade marginal e usando apenas uma antena interna de instalação simples, com a TV digital essa atitude não é mais possível. Não há recepção ruim, ela simplesmente deixa de existir. O hábito já arraigado que a maioria dos usuários têm de receber TV com uma simples antena interna cria uma expectativa difícil de ser atendida com a TV digital terrestre; é uma consideração que não pode ser esquecida no processo de transição do sistema analógico para o digital, porque impõe uma distinção clara entre as regiões onde *há* cobertura e aquelas *não* cobertas.

Nas áreas urbanas, uma preocupação adicional é a presença de ruído radioelétrico produzido pelo homem. Em especial, o ruído impulsivo irradiado por motores que possuem velas de ignição, ou por motores elétricos dotados de comutador e escovas, é visível na imagem analógica. No sistema digital, os processos de correção de erros em rajada (*burst errors*) trazem uma melhoria considerável na imunidade à interferência radioelétrica (BARTON, 1999).

Uma outra distinção entre os sistemas analógico e digital é possibilidade de, neste último, ser possível a *transmissão hierárquica*. Significa que, em um mesmo sinal emitido, estão disponíveis, à escolha de quem o recebe, diversas qualidades de imagem. Aqueles que estão localizados em áreas de sinal adequado podem receber a programação em HD. Nos locais de sombra, ou sujeitos a maior interferência, ou ainda próximos à franja externa da cobertura, onde a recepção em HD não for possível, haverá ainda a possibilidade de a recepção ser feita em LD (*baixa definição*), a qual utiliza métodos de modulação mais resistente à influência do ruído, da interferência e do multipercurso. Emitida em faixa estreita (apenas o segmento central da faixa de 6MHz), e com modulação QPSK (*chaveamento por salto quaternário de fase*), o sinal em LD pode ser recebido em condições nas quais a recepção em HD não é possível. Em especial, o sinal em baixa definição transmitido no segmento central, frequentemente denominado *one-seg* (ABNT, 2007a), é destinado a aumentar a probabilidade de recepção em receptores móveis e portáteis.

Do ponto de vista da Teoria da Informação, o canal de transmissão do sistema de TV digital terrestre é diferente daquele de uma comunicação ponto-a-ponto (ITU, 1996), no sentido em que a capacidade do canal varia conforme a localização do receptor. Quanto mais longe, menor a capacidade do canal. Em uma transmissão não-hierárquica, a capacidade do canal não seria plenamente explorada para receptores próximos ao transmissor. A transmissão hierárquica maximiza o aproveitamento do canal próximo à emissora, ao mesmo tempo em que não deixa desamparada a região da franja externa da cobertura. Proporciona também uma melhoria na recepção móvel, talvez a principal vantagem da TV digital terrestre quando comparada à TV a cabo, à recepção via satélite, ou àquela recebida pela internet.

O serviço de TV digital terrestre oferece vantagens e desvantagens em relação ao sistema

analógico de TV. A falha abrupta do sinal digital no final da cobertura é uma desvantagem quando comparada à degradação suave experimentada pelo sistema analógico, porque significa que um cuidado maior deve ser tomado para que uma alta percentagem de usuários possam receber um serviço satisfatório. Acarreta, na prática, a necessidade de que os limites de cobertura sejam definidos para uma alta percentagem de localizações, tanto em termos do nível mínimo de sinal necessário quanto em proteção contra interferência (REIMERS, 2005). Em contrapartida, qualidade plena de imagem é mantida até os limites da cobertura.

A flexibilidade inerente à transmissão digital torna difícil uma comparação direta com o sistema analógico. Não obstante, algumas características parecem bem gerais. O sistema digital pode fornecer:

- uma abordagem mais flexível ao prover serviços de teledifusão terrestre. Significa que, no sistema digital, podem estar disponíveis mais de uma qualidade de imagem, ou mesmo mais de uma programação sobre o mesmo canal, diferentemente da opção única do sistema analógico;
- mais capacidade de programação por MHz de espectro ocupado;
- recepção de maior qualidade;
- maior resistência contra os efeitos deletérios da propagação multipercurso;
- recepção satisfatória em receptores portáteis com antena incorporada; e
- serviço com uma potência irradiada um pouco menor, pelo motivo apresentado no parágrafo a seguir.

Convém ressaltar que tanto o uso mais eficiente do espectro quanto a menor potência irradiada decorrem do fato de que, no sistema analógico, são exigidas uma *C/N (relação portadora/ruído)* maior e uma razão de proteção (quociente entre potência do sinal desejado e aquela do sinal interferente) mais severa que no sistema digital. Por sua vez, a redução na potência emitida pode não ser significativa, caso se procure proporcionar cobertura a uma percentagem muito alta de localizações, com o intuito de se contrapor ao ‘efeito precipício’ já aludido.

Ainda que seja sensato ter presente as desvantagens abordadas, de uma perspectiva mais global é possível concordar que o sistema de TV digital oferece vantagens significativas sobre seu antecessor analógico.

Uma comparação mais detalhada entre as características dos sistemas digital e analógico de TV pode ser encontrada em (DIBEG, 2010), reproduzida nos itens que seguem:

1. *Robustez perante o ruído:* no sistema analógico, um enfraquecimento do sinal recebido degrada a qualidade da imagem, somando ruído ao sinal original. Um sinal digital, por sua vez, necessita apenas ser identificado como '0' ou '1', o que torna a teledifusão digital menos suscetível ao ruído;
2. *Alta taxa de compressão dos sinais de áudio e de vídeo:* já atingidas 1/20 para SDTV e 1/60 para HDTV, com qualidade adequada;
3. *A correção de erros não é possível em sinais analógicos:* em termos básicos, não é mais possível remover o ruído que tenha contaminado um sinal analógico. Já em teledifusão digital, é possível o emprego de técnicas de correção de erros. Nesse caso, apenas erros sobre muitos bits serão percebidos realmente como erros. Mesmo que a transmissão de bits redundantes seja uma desvantagem do ponto de vista da potência transmitida (uma desvantagem apenas para o *broadcaster*, e não para o receptor), ter os erros corrigidos é mais compensador do que não transmitir os bits redundantes. A correção de erros tornou-se uma tecnologia indispensável em sistemas digitais;
4. *Sinais de vídeo, de áudio, e de controle têm o mesmo tratamento:* como todos eles são pacotes de zeros e uns, podem ser tratados da mesma forma. Essa característica torna mais fácil adicionar novos serviços;
5. *Possibilidade de difundir dados em altas taxas:* ao transmitir dados pelo sistema analógico, como Teletexto que usa o tempo de retraço vertical, por exemplo, as taxas obtidas são muito baixas, da ordem de 11 kbits/s por linha horizontal usada (1H). A teledifusão digital terrestre ou satelital alcança taxas de vários Mbits/s. Considerando a disponibilidade de canais de retorno (*uplink*) como o sistema telefônico, ou banda larga sem-fio, é possível conceber muitas aplicações de difusão de *dados*, tais como obter resposta imediata dos espectadores, ou proporcionar acesso fácil à internet;
6. *Facilidade de embaralhamento dos sinais para limitar o acesso:* em contraste com a dificuldade para embaralhar sinais analógicos, os dados digitais podem ser facilmente encriptados, de modo a serem acessíveis apenas aos assinantes do serviço;
7. *Baixa potência de transmissão:* graças à robustez dos sinais digitais ao ruído e à interferência, menores potências de emissão podem ser usadas. Embora a potência de transmissão dependa da taxa de bits e de outros aspectos, de maneira geral pode ser dito que uma transmissão digital pode cobrir a mesma área que uma emissão analógica com apenas 1/10 da potência;

8. *Plano de canalização simplificado*: a menor potência emitida afeta menos os canais adjacentes, ou canais idênticos em áreas diferentes. O plano de canalização fica mais simples, e torna-se possível o uso de um número maior de canais;
9. *Sistema de modulação robusto contra propagação por multipercurso e desvanecimento*: Os chamados *fantasmas* da TV analógica são causados preponderantemente por reflexões em prédios, e são um problema significativo para a teledifusão terrestre analógica. Admitindo que se deseja a taxa máxima de bits em uma faixa limitada de frequências, torna-se impossível lidar com fantasmas usando sistemas de modulação de portadora única. Em lugar disso, OFDM pode ser usada para se contrapor às reflexões. OFDM é útil também nos ambientes móveis.
10. *Aplicável à tecnologia LSI*: a cada ano, os dispositivos LSI (*integração em larga escala*) atingem velocidades e escalas de integração sempre crescentes. Uma vez que a maior parte das tarefas de um receptor digital é processamento de sinais digitais, receptores progressivamente menores e mais baratos podem ser esperados.
11. *Queda brusca na qualidade do serviço imediatamente além da área de serviço*: na teledifusão analógica, afastar-se do transmissor significa mais ruído na tela, uma deterioração gradual da imagem à medida que enfraquece o sinal recebido. Por outro lado, na teledifusão digital, as técnicas de correção de erros produzem uma subida acentuada e repentina na curva da taxa de erro de bit como função da potência recebida. Como consequência, receber uma potência ligeiramente abaixo do limiar mínimo acarreta uma *perda completa* da recepção, ao contrário da perda gradual de qualidade percebida no sistema analógico.
12. *Necessidade de novas frequências para a teledifusão digital*
13. *Usuários precisam adquirir receptores novos*: os receptores analógicos são incapazes de receber teledifusão digital. Portanto, os usuários do sistema terrestre devem adquirir receptores digitais ou, ao menos inicialmente, conversores (*set-top boxes*) que recebam o sinal digital pela antena, e forneçam sinais analógicos de áudio e de vídeo aos receptores analógicos ainda em uso.
14. *Estações teledifusoras necessitam investimentos*: entre vários equipamentos adicionais, são necessários às estações teledifusoras: codificadores de vídeo e de áudio, equipamento para produzir programas para difusão de dados, equipamentos de operação e de transmissão.

2.2 RECEPÇÃO *INDOOR*

A característica de degradação suave do sistema analógico permitiu que muitos usuários, em zona urbana, se habituassem a receber os sinais de TV terrestre com uma antena interna. É natural portanto sua expectativa de a mesma atitude ser possível em relação aos sinais de TV digital. Porém, nos planejamentos de cobertura, pressupõe-se que o receptor está equipado com uma antena *externa*, instalada a 10m acima do solo (ANATEL, 1991). Essa diferença é significativa, e precisa ser tomada em consideração se o que se busca é uma cobertura que abranja 90% ou mais das localizações (REIMERS, 2005). Uma vez que a principal vantagem da recepção sem-fio é propiciar mobilidade, é necessário que a idéia ‘portátil *indoor*’ forneça uma qualidade adequada, para torná-la competitiva com a recepção via satélite ou por cabo, opções claramente *fixas*.

Com essa perspectiva em mente, algumas considerações foram feitas (REIMERS, 2005). Na Inglaterra, por exemplo, a recepção de TV digital DVB-T em receptores portáteis no interior de prédios não foi um critério de planejamento. Em países como a Alemanha, onde a porcentagem de lares equipados com TV a cabo ou via satélite excede 90%, a modalidade ‘portátil *indoor*’ é praticamente obrigatória para que a teledifusão terrestre se mantenha competitiva. No Brasil, tendo presente que a maioria dos transmissores digitais emitirão a partir das torres hoje instaladas para o sistema analógico, com potências menores, faz esse aspecto merecer atenção, em especial durante a fase de transição do sistema analógico para o digital. E, em geral, os *softwares* para cálculo de cobertura não consideram essa particularidade (REIMERS, 2005).

Para um receptor portátil exterior aos prédios, a diminuição da altura da antena de 10m para 1,5m reduz a intensidade de campo em 12dB. A presumível ausência de visada direta nesse caso aproxima o canal para um modelo Rayleigh, o que impõe uma perda adicional de 7 a 8dB. Admitindo 10dB de diminuição de ganho da antena portátil em relação à fixa, e mais 7dB (com 6dB de desvio-padrão) de atenuação média sofrida pelo sinal UHF ao atravessar paredes, encontra-se uma atenuação total teórica de 36dB para a recepção portátil no interior de um andar térreo (REIMERS, 2005). Portanto, não é uma tarefa simples assegurar recepção ‘portátil *indoor*’ adequada em uma elevada porcentagem dessas localizações.

2.3 RECEPÇÃO PORTÁTIL E MÓVEL

O desenvolvimento da TV digital terrestre foi direcionado no sentido de proporcionar a melhor solução para a troca do sistema analógico para o digital, sem requisitos adicionais (LÉVY, 2004). Com o passar do tempo, ocorreu a digitalização dos sistemas satelitais e via cabo, fato

que veio a dificultar o lançamento da TV digital terrestre, ainda percebida pelos teledifusores como uma nova concorrente a competir com a TV a cabo e via satélite, porém com altos custos de transmissão e com menos receitas. Inicialmente vista como a técnica mais simples para substituir a TV analógica, aproveitando as antenas receptoras preexistentes, a implantação da TV digital terrestre acabou por se mostrar não tão simples. Os consumidores teriam que custear uma instalação em seus lares, da mesma forma que ocorreria com TV a cabo ou por satélite. Com a ameaça emergente da TV via internet em banda larga, a TV digital deve ser vista pela perspectiva que evidencia os aspectos em que os sistemas sem-fio são realmente bons: em portabilidade e em mobilidade (LÉVY, 2004).

A preocupação com a mobilidade já motivou estudos de campo no Brasil, na modalidade *one-seg* (BEDICKS-JR. et al., 2008) e mesmo em alta definição (AKAMINE et al., 2010).

Receber TV digital em plataformas móveis não é tão simples (LÉVY, 2004). Para a recepção fixa, é suficiente assegurar uma $C/(N+I)$ (*quociente entre a potência do sinal desejado e a soma das potências dos sinais interferentes e do ruído*) mínima, que se traduz em uma intensidade de campo mínima correspondente em um canal com ruído aditivo, branco e gaussiano (AWGN). Mesmo considerando os valores correspondentes para canais do tipo Rayleigh ou Rice, a experiência de campo (LÉVY, 2004) mostra que:

- esses valores de C/N não consideram todas as realizações estatísticas dos canais Rayleigh e Rice existentes; significa que, na prática, existirão localidades com desvanecimento superior às margens consideradas nos modelos (Rice e Rayleigh);
- os valores necessários de C/N não existem em todas as localizações. Portanto é necessário encontrar soluções no receptor (por exemplo, diversidade espacial (AKAMINE et al., 2010)) para aumentar a porcentagem de localizações servidas.

2.4 COMPETIÇÃO COM OUTRAS ALTERNATIVAS

A programação televisiva disponibilizada por meio do sistema de TV digital terrestre não é a única opção. Além da TV a cabo e via satélite, o acesso à internet em banda larga está se popularizando progressivamente (REIMERS, 2006). WiMAX (*acesso em banda larga e sem-fio no último quilômetro*) tem a potencialidade de fornecer serviços de banda larga mesmo aos lares mais remotos. Em certas regiões, um enlace de fibra óptica pode chegar até a residência. Dependendo do comprimento do *loop* final, DSL (*linha digital de assinante*) pode fornecer acesso com velocidade de Mb/s. Nesse cenário, não passaria despercebida a possibilidade de disponibilizar também um serviço de televisão, designado genericamente como IPTV (*televisão*

sobre protocolo de internet), cuja descrição e aplicações estão descritas em (REHME, 2007). Dentre as opções de TV ‘conectada’, é digno de nota o fruto da colaboração entre Intel, Google, Sony, e Logitech, denominado *Smart TV* (INTEL, 2010).

Uma recente pesquisa de mercado (PARKS, 2010) informou que três milhões de lares norte-americanos estavam prontos para adquirir um receptor de TV ‘conectado à internet’ nas compras de Natal de 2010. Cerca de 25% das residências com banda larga instalada já possuem ao menos um equipamento conectado, e em um quarto desses lares foi adquirido pelo menos um programa não-gratuito VoD (*video por encomenda*) no mês anterior à entrevista.

A recepção via satélite ou a cabo, por sua vez, caracteriza-se pelo fato de o assinante adquirir ‘pacotes’, isto é, um conjunto amplo de canais que é configurado pela empresa fornecedora. Em geral, não é dada ao assinante a opção de fazer uma escolha *a la carte*. Ele deve optar por um dos pacotes postos à disposição. É comum, portanto, que um número expressivo desses canais seja pago e quase nunca assistido. No entender de (PUTMAN, 2010), formou-se uma espécie de ‘socialismo’, no qual canais que não sobreviveriam por si mesmos são mantidos por canais competentes sobretaxados. Essa situação tem estimulado movimentos de abandono do serviço por parte de alguns assinantes, conhecidos como ‘*cord cutting*’.

No Brasil, é sabido que vários assinantes de TV a cabo optaram pelo serviço primordialmente para melhorar a qualidade da recepção de canais analógicos abertos, que já são disponíveis via antena (MARTINS, 2010). O advento da TV digital por teledifusão, gratuita e com qualidade de imagem superior à do sistema analógico a cabo, pode impactar nesse mercado.

2.5 CONCEITUAÇÕES

2.5.1 INCERTEZAS NA PREDIÇÃO DE PROPAGAÇÃO

A propagação de ondas eletromagnética é um fenômeno complexo, especialmente nas faixas de VHF (*very high frequency*) e superiores, onde os obstáculos formados por prédios, árvores e morros apresentam dimensões comparáveis ao comprimento de onda. Muito da variabilidade reportada decorre de tentar considerar a potência recebida como função de apenas uma variável, a distância. Essa simplificação desconsidera a distribuição irregular dos obstáculos, naturais e artificiais, interpostos entre emissor e receptor. A consequente dispersão nos dados dificulta a criação de modelos precisos, e alarga as margens de erro nas tentativas de prever o fenômeno. A figura 8, que apresenta valores de potência recebida no canal 41, medidos em Curitiba, com distâncias de 2,5 a 3,5km entre transmissor e receptor, exemplifica essa dispersão.

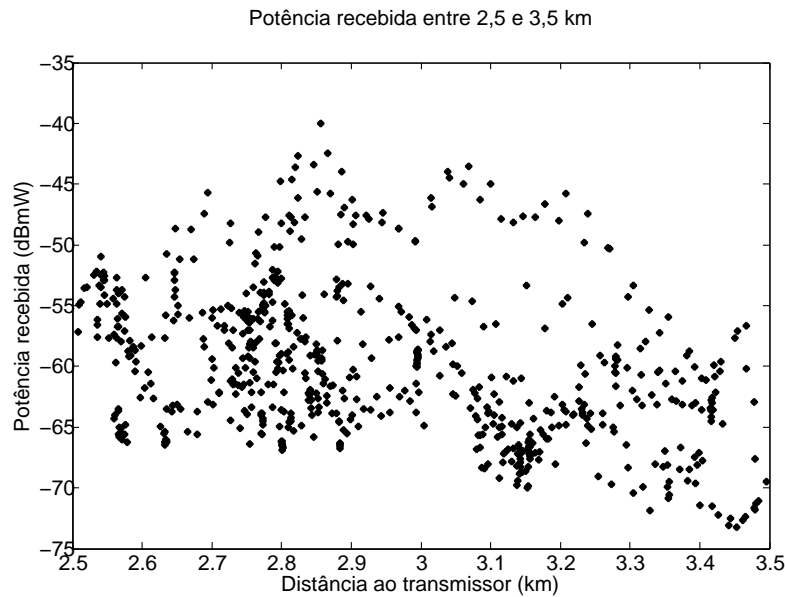


Figura 8: *Dispersão nos valores medidos de potência recebida em função da distância entre emissor e receptor.*

2.5.2 COBERTURA E SERVIÇO

Uma distinção mais precisa entre cobertura e serviço é útil para manter a exatidão dos conceitos; o simples fato de a potência do sinal recebido estar acima do limiar de sensibilidade do receptor não assegura que o serviço está adequado. A indagação sobre se uma localidade está coberta depende não só da potência recebida (WECK, 1999), mas sim se o receptor consegue fornecer som e imagens com qualidade. Portanto, os parâmetros de modulação escolhidos, a codificação de canal adotada, o tipo de canal por onde se dá a transmissão, além do desempenho do próprio receptor, devem ser todos considerados em detalhe.

O planejamento de cobertura em teledifusão terrestre digital é amplamente baseado em predições computacionais (WECK, 1999). Portanto é importante determinar quão bem essas predições se comparam com a cobertura efetivamente medida. De acordo com (WECK, 1999), a BBC (*British Broadcasting Company*) conduziu uma ampla campanha de medições, tanto na área de Londres quanto no noroeste da Inglaterra. Foi medida a percentagem de cobertura em quadrados com 1km de lado. Foram considerados apenas aqueles quadrados com um nível marginal de cobertura. Eles foram selecionados por meio dos resultados iniciais de predição de cobertura com o emprego de um modelo de propagação em computador. De 10 a 15 medidas foram tomadas em pontos aleatoriamente selecionados dentro de cada quadrado, com o objetivo de determinar a percentagem desses pontos em que se obtinha recepção. Em 80% dos quadrados, a cobertura medida foi melhor do que a predita pelo modelo. A maioria das áreas onde a cobertura medida não foi tão boa quanto a previsão já era conhecida por ter má recepção

no sistema analógico. Em geral, essa deficiência era devida à presença de prédios altos, que não foram considerados no modelo computacional.

2.6 OBJETIVOS

2.6.1 OBJETIVO GERAL

As entidades de teledifusão, privadas ou públicas, têm um interesse permanente em conhecer a região geográfica servida por suas emissões. Modelos computacionais podem fornecer informações detalhadas sobre a área coberta, ao implementar variados métodos de predição baseados em normas nacionais (ANATEL, 2005) (ANATEL, 1991) e internacionais (ITU, 2003) (ITU, 2007b).

Enquanto tais métodos computacionais são indispensáveis para que os órgãos governamentais reguladores definam frequências, potências e localização das emissoras, *medir* o sinal após sua implementação é atividade imprescindível para validar as predições (ITU, 2005), e para identificar precisamente áreas de recepção difícil, a fim de solucionar as deficiências (PULLEN, 1999). Analisar as especificidades inerentes, e validar uma metodologia prática para conhecer a cobertura real de um sistema de TV digital é o objetivo geral deste trabalho.

2.6.2 OBJETIVOS SECUNDÁRIOS

Modelagem computacional e medição direta não são abordagens que competem entre si; são antes complementares. Até porque os métodos computacionais de predição também empregam modelos empíricos, baseado em um número elevado de medições, como o de Okumura-Hata e o da Recomendação 1546-1 da ITU (ITU, 2003). Assim, um objetivo secundário deste trabalho é apreciar a coerência entre os valores preditos e os medidos. Também será observada a influência das implantações sobre o terreno próximas ao local de recepção (*clutter*), e os valores medidos dos retardos de multipercurso.

3 ESPECIFICIDADES INERENTES AO CONHECIMENTO DA COBERTURA

O efeito combinado das múltiplas reflexões e do pequeno comprimento de onda acarreta uma variabilidade muito acentuada no valor da potência recebida no ambiente urbano. Mudanças de alguns centímetros na posição da antena receptora impõem variações de dezenas de dB ao sinal captado. Devido a essa grande variabilidade do mensurando, sua avaliação, seja por medição direta ou por cálculo, reveste-se de peculiaridades que influenciam a escolha dos métodos. Algumas dessas particularidades são abordadas neste capítulo, porquanto embasam a metodologia de medição apresentada no capítulo subsequente.

3.1 VARIABILIDADE DO MENSURANDO

A intensidade do sinal recebido varia tanto no tempo quanto em localização (ITU, 2007a). O sinal pode ser formado por componentes diretas, difratadas, refletidas ou refratadas. É de se esperar, portanto, variações significativas no sinal recebido.

Uma percepção qualitativa da variabilidade no valor de potência recebida pode ser formada a partir da observação da figura 9. Ela apresenta valores medidos de potência recebida em função da separação, em quilômetros, entre transmissor e receptor. Trata-se de um sinal de TV digital, com faixa de 632 a 638MHz, medido em Curitiba.

3.2 OS MÉTODOS DE USO CORRENTE

Durante a fase de dimensionamento da estação de teledifusão, decisões precisam ser tomadas relativamente a alturas de torres, localização, potência dos transmissores e antenas de emissão. Nesse momento, modelos computacionais são utilizados para avaliar a cobertura que pode ser obtida a partir de algumas combinações, ditadas mais por considerações econômicas do que técnicas. É quando *softwares* sofisticados de predição de cobertura, como (LLC, 2008), embasam o processo decisório do empresário de teledifusão. Por seu turno, os órgãos reguladores do uso do espectro eletromagnético precisam de informações quantitativas sobre as intensida-

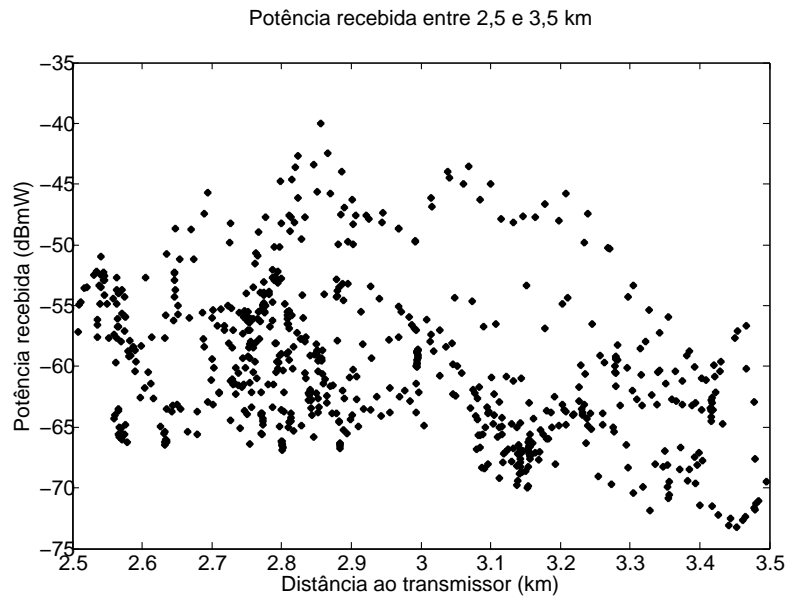


Figura 9: Variabilidade nos valores medidos de potência recebida em função da distância entre emissor e receptor.

des de campo que podem ser produzidas por determinado emissor, tanto para o enquadramento normativo de sua cobertura quanto para avaliar possíveis interferências. Normas internacionais, como (ITU, 2003), e nacionais, como (ANATEL, 1991), foram criadas para orientar o processo. A tabela 2 reúne um conjunto abrangente de modelos de propagação recomendados pela ITU.

Cálculos de propagação podem ser enquadrados em duas grandes categorias: métodos de previsão *ponto-a-ponto* e métodos de previsão *ponto-área*. Os primeiros são adequados quando a localização do receptor é perfeitamente conhecida, e não muda. Os segundos são concebidos para o caso de *broadcasting*, onde a localização exata de cada receptor não é conhecida *a priori*, e também para outras situações em que os receptores são móveis.

Nos métodos ponto-a-ponto, são em geral conhecidas a topografia e as implantações sobre o terreno ao longo do percurso onde ocorre a propagação. Isso permite um cálculo mais refinado, que pode considerar em detalhe as eventuais obstruções do primeiro elipsóide de Fresnel, difrações em torno de obstáculos e efeitos da refração troposférica.

3.2.1 VARIABILIDADE DAS LOCALIDADES

Nos métodos ponto-área, a região de cobertura presumível é dividida em quadrículas de dimensões variáveis: 200 x 200m (ANATEL, 1991), 1 x 1km (PULLEN, 1999), quadrículas com lados entre 100 e 200m para VHF e UHF (ITU, 2003), quadrículas com lados de 500m (ITU, 2007b) para citar alguns exemplos. A cada quadrícula é associado um valor de campo

elétrico *mediano*, isto é, um valor que será superado por 50% das medições feitas dentro da quadrícula à qual está associado o valor de intensidade de campo elétrico, durante 50% do tempo. Esse valor é geralmente denominado $E(50, 50)$, e é um dos principais valores fornecidos pelos métodos ponto-área. Se o tamanho da quadrícula for relativamente pequeno, o percurso entre transmissor e receptor tende a não se alterar significativamente com a movimentação do receptor no interior da quadrícula. O fator de maior influência sobre as variações de campo elétrico medido, conhecida como *variabilidade das localidades*, será a alteração da cobertura local do terreno (prédios, árvores, pessoas, veículos, etc.) nas proximidades da antena receptora. Essa variabilidade tem uma distribuição estatística aproximadamente lognormal (ITU, 2003), o que significa dizer que os valores de campo, expressos em dB, têm uma distribuição estatística gaussiana (densidade de probabilidade normal).

Assim, para uma quadrícula onde o campo elétrico mediano é $E(50, 50)$, o valor de campo elétrico $E(q)$ que será excedido em $q\%$ das medições é avaliado pela expressão (1) (ITU, 2003):

$$E(q) = E(50, 50) + Q_i(q/100)\sigma_L(f) \quad (1)$$

onde:

- $Q_i(x)$: distribuição cumulativa normal complementar inversa, em função da probabilidade, detalhada nas equações (3) e (4) a seguir;
- σ_L : desvio-padrão da distribuição gaussiana das médias locais na área sob estudo.

O valor do desvio-padrão para os sistemas digitais com largura de banda *inferior* a 1MHz e para sistemas analógicos são dados, em dB, pela equação (2) (ITU, 2003):

$$\sigma_L(f) = K + 1,6 \log_{10}(f) \quad (2)$$

com:

- $K=2,1$ para sistemas móveis em localidades urbanas;
- $K=3,8$ para sistemas móveis em localidades suburbanas ou entre morros suaves;
- $K=5,1$ para sistemas de radiodifusão analógicos;
- f =frequência em MHz.

Para sistemas digitais com largura de banda *igual* ou *superior* a 1MHz, deve-se usar um desvio-padrão de 5,5dB em todas as frequências, conforme a Recomendação ITU-R P.1546-1 (ITU, 2003).

Uma aproximação para $Q_i(x)$, válida para $0,01 \leq x \leq 0,99$, é fornecida em (3) se $x \leq 0,5$, e em (4) se $x \geq 0,5$ (ITU, 2003):

$$Q_i(x) = T(x) - \xi(x) \quad (x \leq 0,5) \quad (3)$$

$$Q_i(x) = -[T(1-x) - \xi(1-x)] \quad (x \geq 0,5) \quad (4)$$

onde:

$$T(x) = \sqrt{[-2\ln(x)]} \quad (5)$$

$$\xi(x) = \frac{(C_2T(x) + C_1)T(x) + C_0}{[(D_3T(x) + D_2)T(x) + D_1]T(x) + 1} \quad (6)$$

com:

- $C_0=2,515517$;
- $C_1=0,802853$;
- $C_2=0,010328$;
- $D_1=1,432788$;
- $D_2=0,189269$;
- $D_3=0,001308$;

Considerado isoladamente, o alcance de uma emissão de RF (*radiofrequência*) seria infinito. O que efetivamente impõe um limite para o alcance de um sinal desejado são outros sinais, *indesejados*, que com ele competem. São formados pelo ruído radioelétrico (natural ou produzido pelo homem), pelo ruído gerado internamente no receptor, e por outras emissões, distantes e no mesmo canal, ou em canais adjacentes. Para prever coberturas, os métodos ponto-área estimam a distância máxima na qual o sinal desejado ainda tem uma amplitude suficiente para concorrer favoravelmente com os sinais indesejados presentes na mesma antena receptora. A avaliação do efeito combinado que vários sinais interferentes têm em um mesmo

ponto de recepção pode ser feita por um método devido a Schwartz e Yeh, *apud* (PULLEN, 1999).

3.2.2 VARIABILIDADE COM O TEMPO

Percursos mais longos acentuam a influência do índice de refração troposférico sobre a amplitude do sinal recebido na faixa de 30 a 3000MHz, usualmente modeladas por meio do raio terrestre equivalente. Em percentagens baixas de tempo, o sinal emitido pode produzir intensidades de campo a longas distâncias que não seriam esperadas, se consideração fosse feita apenas às curvas que fornecem $E(50, 50)$. Portanto, para estudar interferências que determinado sinal pode produzir, interessa saber que intensidades ele pode atingir, mesmo que em percentagens menos significativas do tempo de observação. Com esse objetivo, as normas costumam fornecer dados para $E(50, 10)$ e $E(50, 1)$, valores de campo elétrico superados apenas em 10 e em 1% respectivamente do tempo de observação para uma determinada separação entre emissor e receptor. Além de outras fontes, esses valores de $E(50, 10)$ e $E(50, 1)$ podem ser encontrados em (ITU, 2003) e (ITU, 2007b). Essas informações embasam a decisão dos órgãos administradores do espectro eletromagnético quanto à separação mínima que deve existir entre emissoras, a fim de que qualquer delas não interfira sobre os receptores localizados na área de cobertura de outra emissora, dentro do chamado contorno protegido.

Para distâncias de 50km, e para percursos terrestres em UHF, a Recomendação ITU-R P.1406 informa um desvio-padrão para variabilidade temporal de apenas 2dB (ITU, 2007a). Para as distâncias ainda menores encontradas nas medições em Curitiba, as variações temporais podem ser desconsideradas, particularmente quando confrontadas com os desvios-padrão devidos às variações de localidade.

3.3 SIMULAR OU MEDIR?

O emprego de métodos computacionais de previsão diminui, em princípio, a necessidade de extensos levantamentos experimentais. Entretanto, o trabalho de campo ainda é necessário para validar as previsões (ITU, 2005) (ITU, 2007a). Também é importante para localizar áreas de recepção difícil, a fim de que recebam a atenção necessária (PULLEN, 1999), (PLUMB et al., 1999) (ITU, 2007a). Visando a melhorar a acurácia dos prognósticos de cobertura, softwares como o EDX (LLC, 2008) disponibilizam vários modelos de cálculo, à escolha do utilizador. São modelos sofisticados, que incorporam refinamentos, e buscam realizar previsões que se aproximem o mais possível das medições experimentais. À medida em que se comparam os

valores preditos pelos modelos com aqueles efetivamente medidos compreende-se melhor por que há tantas opções de modelos incorporadas ao software. Para que as predições dos modelos se tornassem mais acuradas, seria preciso incluir no modelo objetos não transparentes às irradiações, como prédios, torres, e outras implantações. Seria necessário obter suas dimensões e localizações precisas, e também características eletromagnéticas de seus materiais constitutivos. Esse procedimento é ainda mais demorado e caro do que a medição direta do sinal efetivamente recebido.

Desde que os custos e prazos permitam, medir é sempre mais preciso que calcular. A acurácia de uma medição, ainda que efetuada com recursos limitados, supera a das predições dos modelos, como se verá no decorrer deste trabalho.

3.3.1 MEDIR É VIÁVEL

As técnicas para medir intensidade de campo recebido estão já estabelecidas (TERMAN; PETTIT, 1952) (ROHDE&SCHWARZ, 1988). Para o caso de *broadcasting*, importa que o número de medições seja expressivo, para que a área a ser investigada abranja quantidade significativa de receptores (ITU, 2007a). Significa dizer que o método de medição precisa coletar um número elevado de medidas sem se tornar excessivamente custoso ou demorado. Portanto, automatizar as medições, e tomá-las de um veículo em movimento, é importante para tornar o método viável. Essa foi a abordagem escolhida para os ensaios em Curitiba. Ela difere do método tradicional, com antena receptora montada a 10m do solo, em um mastro telescópico (CASTELLANOS et al., 2010) (VASCO, 2009) (ITU, 2003), e permite coletar um volume maior de dados em menos tempo, conforme analisado em 6.3. Medir com a antena receptora a 10m do solo aproxima a condição de antena externa em casa térrea; medir com antena a 2m do solo, sobre um veículo em movimento, aproxima a condição de recepção móvel.

Para ilustrar as ordens de grandeza, um trecho denominado ‘primeiro afastamento na avenida Canadá’ tem seu trajeto detalhado no mapa da figura 10. O trecho é sobre a avenida Canadá, entre a rua Holanda e o Parque General Iberê de Mattos, no bairro Bacacheri, em Curitiba-PR. Nele foram tomadas 60 medições de potência recebida e de resposta impulsiva. O trecho mede 1914m, e foi percorrido em 4,932 minutos. A velocidade média no percurso foi de 23,28km/h, o que permitiu medir 31,348 pontos por quilômetro. Isso significa uma medida a cada 32m de percurso, a uma taxa média de 12,16 medidas por minuto.



Figura 10: Trajeto do primeiro afastamento na avenida Canadá. Círculos vermelhos assinalam potência recebida abaixo do limiar.

Fonte: Adaptado de *Google Maps*

3.3.2 REPETIBILIDADE E REPRODUTIBILIDADE DAS MEDIÇÕES

Uma medição só é útil se puder ser posteriormente repetida e/ou reproduzida com coerência. Com o objetivo de verificar essa característica, algum tipo de suavização dos dados medidos precisa ser aplicada, para que a grande variabilidade da potência recebida guarde coerência com a região de medição. A figura 11 apresenta os valores medidos sem qualquer tratamento. A dificuldade de repetir ou de reproduzir a mesma medida em um dado ponto é facilmente percebida.

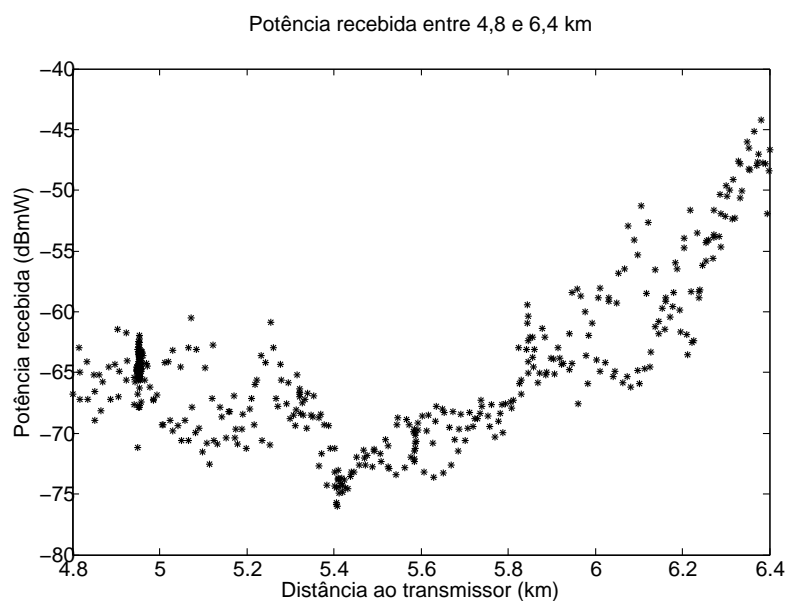


Figura 11: Medidas sem qualquer tratamento, tomadas entre 4,8 e 6,4 km..

Visando a suavizar as variações rápidas com a distância na intensidade do sinal recebido, calculou-se o valor médio de várias medidas adjacentes, para associar esse valor médio ao local de medição. Após alguns ensaios, elegeu-se o valor 5 para o tamanho da janela deslizante, de modo que, a cada valor de distância, associa-se a média de 5 medidas em 5 pontos adjacentes a essa distância. Esse valor de 5 medições representa uma quadrícula com cerca de 150m de lado, valor compatível com a Recomendação ITU-R P.1546-1 (ITU, 2003). Assim, cada quadrícula passa a ter uma ‘distância’ (média de 5 distâncias) e uma ‘potência recebida’ (média de 5 valores de potência recebida). O resultado obtido encontra-se na figura 12.

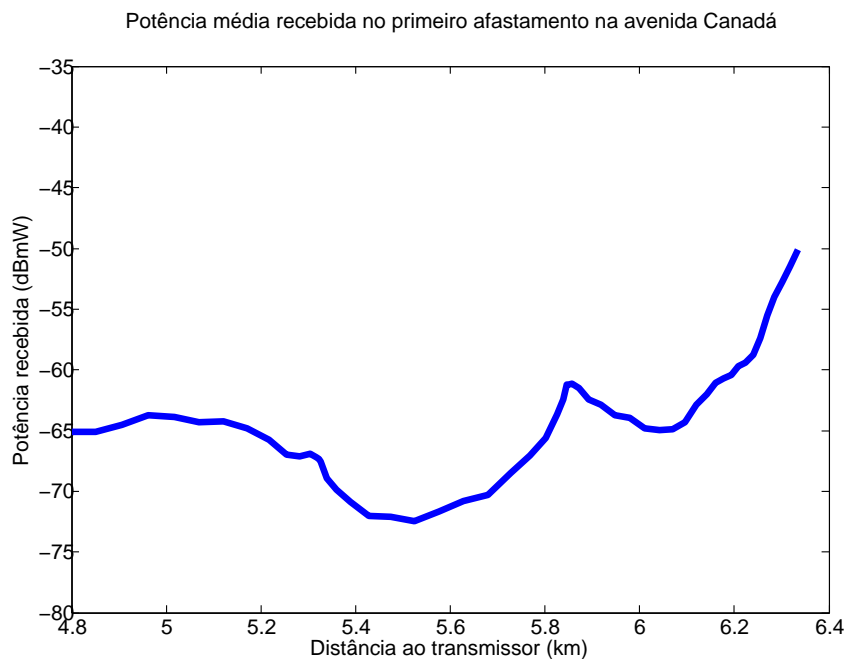


Figura 12: Média de 5 medidas adjacentes de potência recebida na avenida Canadá, primeira passagem.

O caminho percorrido é o mesmo já representado na figura 10. Nela, os círculos verdes assinalam os locais onde a potência recebida encontra-se acima do limiar estabelecido em 4.2. Os círculos vermelhos indicam os locais onde não é esperado ocorrer recepção nas condições em que a medição foi realizada, com antena receptora posicionada na pista de rodagem, e altura de 2m em relação ao solo.

Não basta o resultado ser suave, é preciso que ele possa ser *repetido e reproduzido* com coerência. Para verificar a repetibilidade, compararam-se as potências médias recebidas em duas passagens sucessivas pela mesma avenida, com um intervalo de cerca de 40 minutos entre um e outro percurso. A repetibilidade da medição pode ser avaliada por meio da figura 14. É útil ressaltar que, embora as medições em ambos os percursos ocorreram a não muito mais de meia hora entre elas, o veículo esteve sujeito às restrições do trânsito. Significa que não trafegou na mesma velocidade, nem que percorreu necessariamente a mesma pista de rodagem. Em face

do pequeno comprimento de onda utilizado no ensaio, da ordem de 0,5m, essas modificações podem alterar mesmo os valores médios.

O caminho percorrido no segundo afastamento na avenida Canadá está na figura 13.



Figura 13: *Trajeto do segundo afastamento na avenida Canadá. Círculos vermelhos assinalam potência recebida abaixo do limiar.*

Fonte: Adaptado de *Google Maps*

Com o objetivo de avaliar a reprodutibilidade e a coerência dos valores medidos, foi percorrido um percurso próximo ao já mencionado, representado na figura 16. Ali estão representadas as potências recebidas em duas avenidas paralelas e adjacentes. O trajeto da primeira aproximação na avenida Paraná está representado na figura 15. Como anteriormente, os círculos verdes assinalam os locais onde a potência recebida encontra-se acima do limiar. Os círculos vermelhos indicam os locais onde não ocorreu recepção nas condições em que foi realizada a medição.

Note-se que, apesar da pequena variação em distância ao transmissor, os níveis médios do sinal têm variação da ordem de 5dB entre uma avenida e a outra. Essas diferenças provavelmente são causadas pelos prédios às suas margens. Como os prédios não são considerados nos modelos computacionais, é impossível que qualquer das simulações predissesse as diferenças encontradas na figura 16, o que reforça a importância de medir.

3.4 EFEITOS DA POLARIZAÇÃO

Em um ambiente móvel e terrestre, uma parte da energia do sinal transmitido pode ser espalhada fora da polarização original em decorrência das difrações e reflexões da onda eletromagnética propagada (ITU, 2007a). Uma forma de medir esse efeito é com o uso do assim

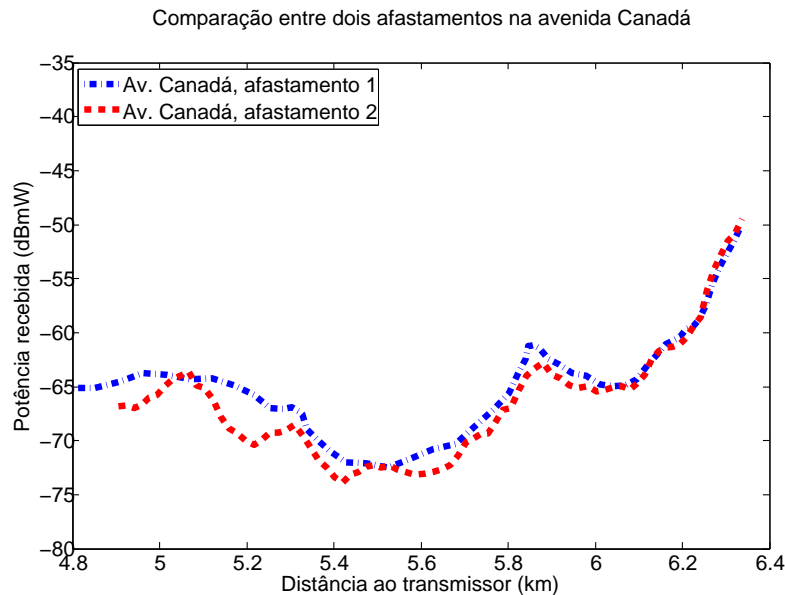


Figura 14: Comparação entre os sinais medidos na avenida Canadá, em duas passagens sucessivas, separadas por 40 minutos, para verificar a repetibilidade do método.

chamado XPD (*fator de discriminação da polarização cruzada*), definido na Recomendação ITU-R P.310 *apud* (ITU, 2007a). Em termos básicos, tal fator informa quantos dB abaixo da intensidade recebida na polarização normal está o sinal captado na polarização ortogonal, no mesmo local e pela mesma antena apropriadamente modificada para receber a polarização ortogonal à emitida.

Conforme a Recomendação ITU-R P.1406-1 (ITU, 2007a), medições em 900MHz mostram que:

- XPD depende pouco da distância;
- o valor médio de XPD em áreas urbanas e residenciais fica entre 5 e 8dB, e supera 10dB em áreas abertas;
- a correlação média entre as polarizações vertical e horizontal é nula;
- XPD cresce com a diminuição da frequência, e atinge cerca de 18dB a 35MHz;
- XPD tem distribuição log-normal, com desvio-padrão que depende um pouco da frequência.

Na faixa de 30 a 1000MHz, a diferença entre os valores de XPD superados em 10% e em 90% das medições é da ordem de 15dB, pouco importando se a polarização original é horizontal ou vertical.



Figura 15: Trajeto da primeira aproximação na avenida Paraná. Círculos vermelhos assinalam potência recebida abaixo do limiar.

Fonte: Adaptado de Google Maps

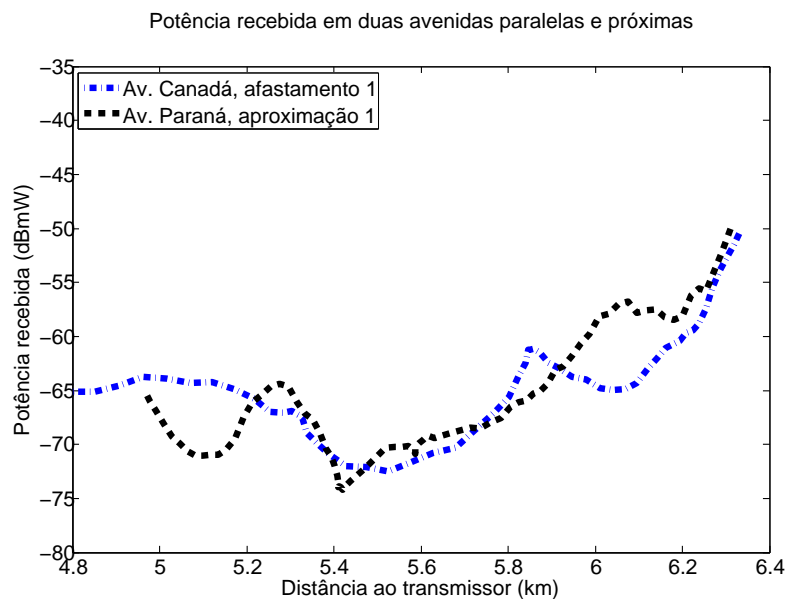


Figura 16: Comparação entre os sinais medidos nas avenidas Canadá e Paraná.

Devido à quantidade considerável de espalhamento em áreas urbanas e residenciais, e aos consequentes baixos valores de XPD, diversidade de polarização pode ser uma técnica útil para melhorar a recepção. Uma alternativa pode ser emitir com polarização circular, e receber com polarização linear. Mesmo com a perda teórica de 3dB (metade da energia na polarização ortogonal), um receptor móvel pode se beneficiar de um sinal com amplitude mais constante.

Durante os ensaios, a antena receptora foi temporariamente orientada na polarização ortogonal, com pouca influência na potência recebida. Esse teste foi feito tanto com um monopólo $\lambda/4$ quanto com uma antena log-periódica comercial destinada à faixa de frequências medida.

Conquanto na área urbana seja normal um espalhamento de energia para a polarização ortogonal, em trajetórias menos obstruídas, e com predominância da componente em visada direta, seria plausível esperar uma perda maior ao se receber o sinal com uma antena na polarização ortogonal. Não foi possível, porém, evidenciar esse efeito a partir dos dados coletados, fato cujo esclarecimento permanece pendente.

Com base nas considerações desta seção (ITU, 2007a) e em medições preliminarmente efetuadas, foi adotado o valor de 7dB como perda decorrente do uso de uma antena vertical para receber sinais transmitidos originalmente em polarização horizontal.

3.5 ESCOLHA DO TRAJETO

O percurso escolhido para o ensaio não teve a ambição de constituir-se em um levantamento de cobertura. Antes, a seleção do trajeto baseou-se nas seguintes considerações:

- facilidade de deslocamento;
- alta densidade de telespectadores;
- facilidade em passar mais de uma vez pela mesma via (para verificar a repetibilidade);
- coerência (esperava-se sinal mais fraco *atrás* dos prédios);
- multipercorso (havia dúvidas sobre o quanto ele seria prejudicial).

As especificidades abordadas neste capítulo subsidiaram as definições do método de medição, assunto do capítulo a seguir.

Tabela 2: Modelos de propagação da ITU

<i>Radio Propagation Models</i>	<i>Applied Phenomena and Parameters</i>	<i>Applied Frequency Ranges</i>	<i>Corresponding ITU Recommendations</i>
Gaseous Attenuation Model	Oxygen and water vapor absorption	> 1.0 GHz	ITU-R P.676,836 [12,17]
Scintillation and Multipath Model for Troposphere	Scintillation and multipath fading	> 1.0 GHz	ITU-R P.618 [18]
Attenuation Frequency Scaling Model	Rain attenuation	7 - 50 GHz	ITU-R P.618 [18]
Cumulative Distribution of Fade Duration Model	Fading duration	> 400 MHz	[1,10]
Diffusely Scattering Wave Model	Satellite to mobile with Doppler shift	> 100 MHz	[1,10]
Empirical Roadside Shadowing Model	Canopy shadow for land mobile	> 100 MHz	[1,10]
Maritime Link: Fading Due to Sea Reflection	Rough sea surface for marine mobile	0.8 - 8.0 GHz	ITU-R P.680 [10]
Altshuler Fog Model	Fog attenuation	5 - 100 GHz	ITU-R P.840 [19]
ITU Cloud Model	Cloud attenuation	5 - 100 GHz	ITU-R P.840 [19]
Radio Noise Model	Galactic and atmospheric noise	100 MHz - 100 GHz	ITU-R P.372 [1,10]
ITU Rain Model	Rain attenuation, rain rate distribution	1 - 400 GHz	ITU-R P.618, 837, and 838 [18,20,21]
Global Rain Model	Rain climate zones	1 - 400 GHz	[1,2]
Wet Antenna Surface Model	Wet factor	20 GHz	[1,11]
Ice and Rain Depolarization Model	Co-polar attenuation (CPA) and XPD	4 - 35 GHz	ITU-R P.618,530 [18,22]
Site Diversity Model	Site separation during rain	10 - 30 GHz	ITU-R P. 618 [18]
Line of Sight with Multipath Model	Space to Earth or Earth to Earth	> 2.0 GHz	ITU-R P. 530, and 619 [22,23]
Terrain Diffraction Model	Knife-edge and rounded surface	30 MHz - 10 GHz	ITU-R P.526, and 530 [16,22]
Transhorizon Propagation Model	Anomalous models: Ducting and scattering	> 0.7 GHz	ITU-R P.452 [15]

4 MÉTODO

A escolha do método de medir foi determinada tanto pelas especificidades abordadas no capítulo anterior quanto pelos equipamentos e recursos efetivamente disponíveis. A abrangência das medições, e os materiais, instrumentos e configurações estão a seguir descritos.

4.1 ESCOPO DOS ENSAIOS DE CAMPO

O escopo dos ensaios em campo está limitado pelo equipamento disponível. O objetivo geral é verificar a cobertura do sinal de TV digital sob condições que não são facilmente reproduzíveis em laboratório ou em simulações (WECK, 1999). Nos ensaios que embasaram o presente trabalho, foram registrados, em *cada* medição automatizada, os seguintes valores:

- número de ordem do ponto de medição;
- hora em que foi registrada a medição, fornecida por GPS;
- latitude e longitude do ponto de medição, avaliadas por GPS;
- potência recebida em toda a faixa do canal em dBmW (*dB em relação a 1 miliwatt*);
- MER (*taxa de erro de modulação*); e
- resposta impulsiva, constituída pelas dez versões mais intensas do sinal que trafegaram por percursos múltiplos, caracterizadas por suas amplitudes relativas e retardos, também relativos, sempre à versão multipercurso mais intensa registrada nesta medição. Uma amostra típica está na figura 18.

4.2 CRITÉRIOS PARA AVALIAR A RECEPÇÃO

Quando há multipercurso, a taxa de erro de bit pode ser mais alta do que o esperado. Significa dizer que, para atingir-se uma determinada taxa de erro de bit, é necessária uma C/N mais

elevada em situação de multipercurso (PULLEN, 1999). Na prática, há ainda o ruído impulsivo e as diversas interferências, que tendem a exigir um C/N ainda maior. O ruído radioelétrico emitido pelos veículos automotores pode degradar sistemas em UHF em 10dB ou mais (MIYOSHI; SANCHES, 2002). Embora haja diversas considerações bem elaboradas sobre o limiar a considerar (QEF (*quasi error free*) (WECK, 1999) (ITU, 2005), CRR (*correct reception rates*) (AKAMINE et al., 2010)), o limiar adotado neste trabalho foi uma potência recebida no canal de -72dBmW, porque correspondeu ao nível em que falhou, em campo, a recepção em HD no equipamento empregado nas medições.

4.3 INSTRUMENTOS E CONFIGURAÇÕES

As medições foram tomadas a bordo de um veículo especialmente destinado a esse fim, equipado com GPS (*global positioning system*), inversor de DC (*corrente contínua*) para 60Hz, acomodações apropriadas para operadores, instrumentos e antenas.

4.3.1 SINAL DE TESTE

O sinal de TV digital utilizado nas medições foi aquele irradiado publicamente pela estação que serviu de fonte de sinal para os ensaios, no canal 41 de UHF, com as características a seguir (ANATEL, 2006):

- faixa de frequências de 632 a 638MHz;
- polarização horizontal;
- potência do transmissor 8kW;
- ganho da antena transmissora 10,7 dBd (*dB em relação a um dipolo de meia-onda*);
- EIRP (*potência efetivamente irradiada isotropicamente*) 80,42dBmW; e
- altura do centro de fase sobre o terreno 90m.

O sinal emitido pela estação que serviu de fonte de sinal de teste para os ensaios, no canal 41 de UHF, tem um espectro praticamente plano, composto por 5617 subportadoras COFDM (modo 3). O intervalo de guarda utilizado foi de $63\mu s$ (1/16 da duração do símbolo de $1008\mu s$). A tabela 3 resume a configuração do sinal usado nas medições.

Tabela 3: Parâmetros do sinal usado nas medições

Camadas	A	B
Largura de faixa (MHz)	0,432	6
Intervalo de guarda	1/16	1/16
Quantidade de segmentos	1	12
Tipo de modulação	QPSK	64-QAM
Código convolucional	2/3	3/4
Entrelaçamento no tempo (ms)	400	200
Taxa de bits (Mbits/s)	0,44	17,842

4.3.2 CONFIGURAÇÃO DOS INSTRUMENTOS

A via principal de recepção inicia-se por uma antena do tipo monopólo vertical, com comprimento próximo a $\lambda/4$. Mesmo que o sinal seja transmitido com polarização horizontal, as múltiplas reflexões que sofre em ambiente urbano acabam por criar componente vertical na polarização. De acordo com as considerações feitas em 3.4, uma perda de 7dB foi estimada como consequência desse descasamento de polarização. O monopólo vertical foi escolhido como antena receptora por ser essencialmente não diretivo no plano horizontal, de modo a tornar a recepção quase independente da direção do percurso. Além da conveniência mecânica de sua base magnética de fixação à capota do veículo, o monopólo vertical é uma antena receptora típica para a recepção móvel. O sinal recebido pelo monopólo vertical foi separado em dois caminhos por um divisor de 3,15dB. Um deles alimentou um receptor de TV digital, mantido ligado durante o percurso para avaliar subjetivamente a recepção. O segundo caminho foi conectado a um analisador de espectro do fabricante Rohde&Schwarz, modelo ETL. Esse instrumento mede a potência total na faixa de frequências do canal, BER (*taxa de erro de bit*), MER (*taxa de erro de modulação*), e consegue distinguir os sinais que percorreram caminhos múltiplos, informando suas amplitudes e retardos relativos (ROHDE&SCHWARZ, 2011). A tabela 4 resume algumas características do instrumento analisador de espectro que foi empregado nas medições.

Um diagrama simplificado do material usado na recepção encontra-se na figura 17, e uma tela típica do analisador de espectro alimentado por um sinal real de TV digital ISDB-T_B pode ser vista na figura 18. Todo o material da figura 17 esteve montado a bordo de uma *van* especificamente destinada à atividade, equipada com inversor para 60Hz.

4.3.3 PROCEDIMENTOS DE MEDIÇÃO

O procedimento de medição consistiu em sintonizar o receptor de TV no canal 41, recebido pela antena monopólo vertical $\lambda/4$, cuja base de fixação magnética permaneceu aderida à capota

Tabela 4: Especificações do analisador de TV Rohde und Schwarz ETL

Warm-up time	30 minutes	Three hours storage at ambient temperature
Setting range of signal level		-80dBm to +20dBm in steps of 0,1dB
Level measurement uncertainty	95% confidence level, +20°C to +30°C, S/N>16dB, 0dB to -50dB from reference level, 50MHz < f < 3GHz	< 1,0dB
Attenuator uncertainty		< 0,3dB
Uncertainty of signal level setting		< 0,1dB (nom.)

Fonte: R&S®ETL TV Analyzer Specifications

(ROHDE&SCHWARZ, 2011)

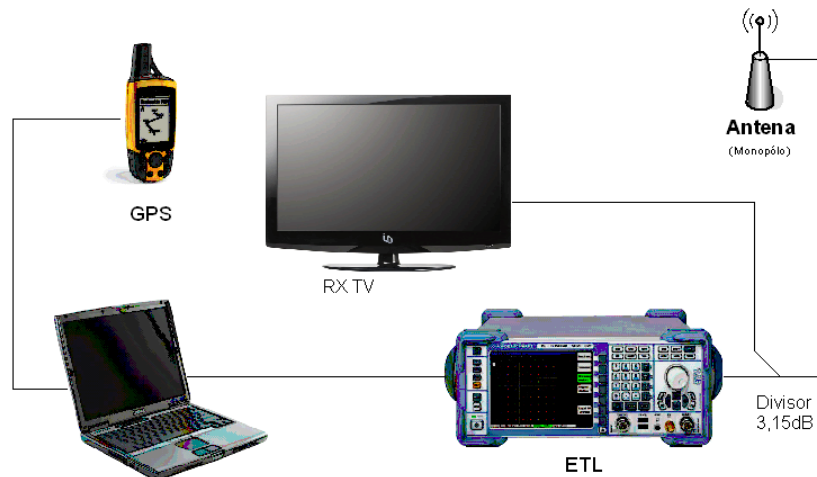


Figura 17: Diagrama em blocos do sistema de recepção.

Fonte: SIRDAI

da van, a 2m do solo. O sinal que provém dessa antena, através de um cabo coaxial com impedância característica de 75Ω , é dividido em dois caminhos, por um divisor de 3,15dB; uma via alimenta o receptor de TV, e a outra se dirige à entrada do analisador de espectro. Com isso, a potência medida à entrada do analisador é praticamente a mesma que alimenta o receptor de TV. Quando a imagem ou som no receptor de TV deixarem de ser satisfatórios, todas as características do sinal estarão disponíveis ao analisador. Os parâmetros do sinal extraídos pelo analisador ETL são enviados ao *laptop*, onde são gravados em uma planilha, para análise posterior. São gravadas todas as informações anteriormente detalhadas em 4.1.

Após o tempo de *warm-up* especificado na tabela 4, a van segue o itinerário previamente definido, e medidas são automática e continuamente realizadas e armazenadas na planilha, a

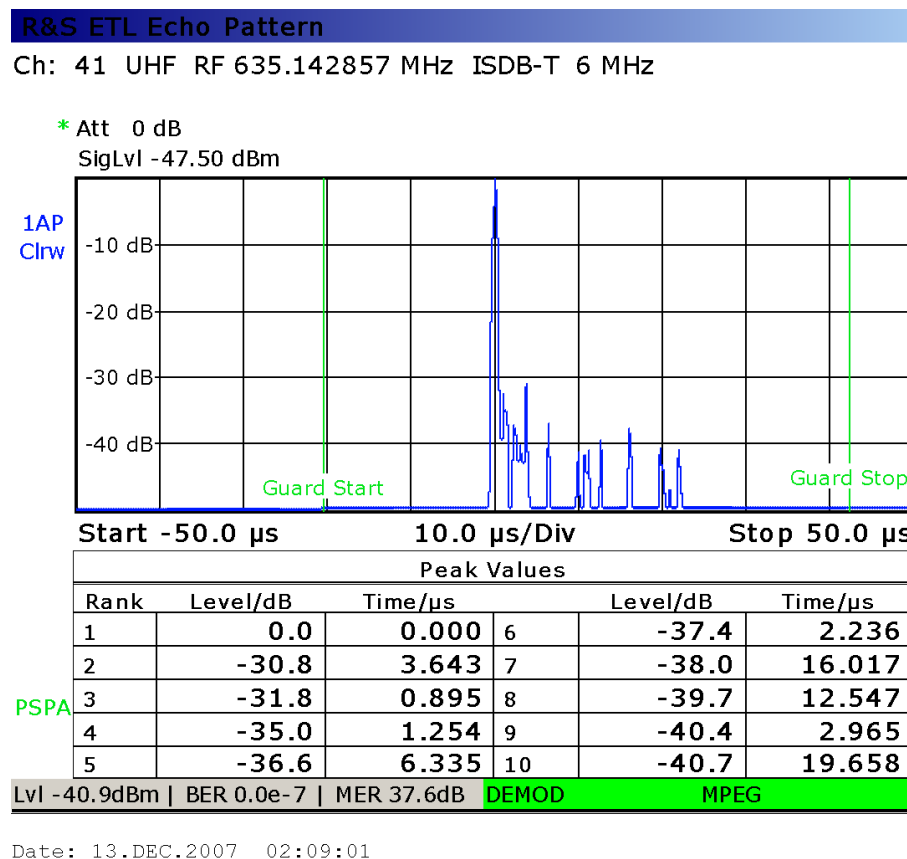


Figura 18: Tela típica do analisador ETL.

um ritmo determinado pela capacidade do ETL. A velocidade de deslocamento do veículo não deve exceder um limite máximo, sob pena de não serem armazenadas medições relativas a multipercurso. Com a configuração adotada, esse limite de velocidade foi experimentalmente determinado entre 10 e 20km/h. A escolha da velocidade é um compromisso entre o prazo disponível para cobrir determinada área e o número de amostras desejado por quadrícula de medição. O tamanho efetivo da quadrícula dependerá de quantas medições serão agrupadas em uma janela deslizante para produzir as estatísticas de tendência central e de dispersão. Essa escolha pode ser feita *a posteriori*, já que os dados medidos estarão armazenados. Neste trabalho, foi adotado o tamanho 5 para a janela deslizante; significa que 5 amostras serão analisadas em conjunto para produzir as estatísticas, o que corresponde a uma quadrícula com cerca de 150m de lado, conforme já mencionado em 3.3.2.

4.4 INCERTEZAS NA MEDIÇÃO

A avaliação da incerteza a respeito dos valores medidos de potência recebida foi feita de acordo com os procedimentos metrológicos usuais (ALBERTAZZI, 2008). Como cada amostra tem 5 medições, a incerteza com respeito à média amostral é avaliada com a distribuição *t* (de

‘Student’) (SPIEGEL, 1977), de acordo com (7).

$$I = I_i + t_{2\sigma}s \quad (7)$$

onde:

- I : diferença entre o valor medido e o valor verdadeiro, que não é superada em 95,45% dos casos;
- I_i : diferença entre o valor medido pelo instrumento e o valor verdadeiro, que não é superada em 95,45% dos casos;
- $t_{2\sigma}$: valor crítico da variável t que delimita uma área de 95,45% em torno da média. $t_{2\sigma}=2,869$ para 4 graus de liberdade;
- s : desvio-padrão da amostra com 5 medições;

Esses valores de incerteza, calculados com $t=2,869$, foram empregados nas figuras do capítulo 5.

Convém notar também que a altura de 2m adotada nos ensaios, além de ser inferior à ‘altura representativa do clutter’, nos termos da Recomendação ITU-R P.1546-1 (mínimo de 10m) (ITU, 2003), também expõe a antena receptora a um sinal com mais multipercurso e a um nível maior de ruído impulsivo, em decorrência da maior proximidade com os sistemas de ignição dos veículos no tráfego. É de se esperar portanto que o limiar de recepção satisfatória ocorra em uma potência recebida maior do que o nível medido em laboratório, de -77dBm. Em campo, o limiar de recepção satisfatória em HD foi determinado experimentalmente em -72dBm à entrada de antena do receptor de TV digital, com as considerações já apresentadas em 4.2.

Colhidos e armazenados os dados, conforme os procedimentos descritos, posteriormente podem ser analisados, assunto abordado no capítulo que segue.

5 ANÁLISE DOS DADOS MEDIDOS

A planilha de dados coletados da maneira descrita no capítulo anterior contém, para cada medição registrada, as informações enumeradas em 4.1. Para melhor entendimento, convém tratá-las primeiro separadamente.

5.1 INTENSIDADE DO SINAL MEDIDO

De acordo com a Recomendação ITU-R P.1546-1 (ITU, 2003), a distribuição de intensidades de campo medianas em ambientes urbanos e suburbanos é aproximadamente lognormal, no que diz respeito às variações causadas pela presença de implantações sobre o terreno. Na análise das medições, calcularemos algumas estatísticas para trechos separados. A idéia é verificar a influência das implantações sobre o terreno, que claramente diferem de um trecho para outro. O conjunto de medidas foi arbitrariamente separado em trechos, que são típicos de diferentes regiões, no que concerne às implantações sobre o terreno às margens da rua percorrida, e também ao trajeto do sinal entre emissor e receptor.

5.1.1 CARACTERIZAÇÃO DE REGIÕES

Para facilitar o deslocamento no trânsito, e principalmente para verificar o comportamento do sinal em vias mais movimentadas, foram escolhidos trajetos que compõem o sistema viário estrutural. Entende-se como sistema viário estrutural o sistema trinário composto por uma via central e duas vias externas, sendo a via central aquela que contém a canaleta para o transporte de massa e as pistas lentas para atendimento às atividades lindeiras, e as vias externas as ruas paralelas com sentido único de tráfego, destinadas ao fluxo contínuo de veículos, tudo nos termos da Lei Municipal 9800/2000 (CURITIBA, 2000). Os terrenos existentes entre as vias externas de tráfego contínuo que compõem o sistema viário estrutural formam os denominados Setores Especiais Estruturais, para as quais são estabelecidas ordenações especiais de uso e de ocupação do solo. No que concerne a este trabalho, neles é permitida a implantação de prédios altos, que acabam por definir regiões diferentes em termos de propagação de sinais em UHF.

O percurso total foi arbitrariamente dividido em trechos, com o objetivo que cada um deles apresente um comportamento típico. Esses trechos foram delimitados pelo número de ordem da primeira (INÍCIO) e da última (FIM) medição considerada como pertencente ao trecho. A tabela 5 agrupa essas informações.

Tabela 5: Delimitação dos trechos por região

<i>Região</i>	<i>Nome do trecho</i>	<i>INÍCIO</i>	<i>FIM</i>
Suburbana	Canadá afastamento 1	136	195
Suburbana	Canadá afastamento 2	480	564
Suburbana	Paraná aproximação 1	218	307
Suburbana	Paraná aproximação 2	585	690
Urbana	Guarapuava passagem 1	884	982
Urbana	Guarapuava passagem 2	1095	1177
Urbana	Batel e Dr. Pedrosa	1284	1389
Urbana densa	Silva Jardim início	1182	1261
Urbana densa	Silva Jardim	985	1077
Urbana densa	Cel. Dulcídio	1262	1273
Urbana densa	Mal. Deodoro e E. Pernetá	1418	1440

5.1.2 REGIÃO URBANA E URBANA DENSA

Talvez a principal meta da medição seja localizar áreas de recepção difícil, a fim de que recebam a atenção necessária (PULLEN, 1999), (PLUMB et al., 1999), conforme já aduzido em 3.3. É útil então comparar características que sejam peculiares a determinadas regiões da cidade. Com esse intuito, comparemos estatísticas de tendência central e de dispersão em dois trechos com significativa diferença na altura dos prédios implantados à margem da rua percorrida, ambos localizados no que convencionamos denominar de região urbana densa.

A figura 19 apresenta um mapa da cidade, sobre o qual estão plotados os pontos de medição registrados no primeiro trecho percorrido na avenida Visconde de Guarapuava. O valor médio da potência recebida em cada quadrícula, juntamente com as duas curvas que representam a incerteza acima ou abaixo do valor médio da potência recebida na quadrícula, encontram-se representados na figura 20. A avaliação da incerteza foi abordada em 4.4.

Uma idéia mais clara a respeito de como se distribuem os valores medidos pode ser encontrada no histograma da figura 21. A altura de cada barra representa a fração do total de medidas no trecho que cai dentro da faixa de potência centrada no valor em dBmW sobre o qual está localizada a barra.

Na figura 22, estão plotados sobre um mapa os pontos de medição registrados na passagem pela avenida Silva Jardim. O valor médio da potência recebida em cada quadrícula, juntamente



Figura 19: Trajeto da primeira passagem na avenida Visconde de Guarapuava. Círculos vermelhos assinalam potência recebida abaixo do limiar.

Fonte: Adaptado de *Google Maps*

com as duas curvas que representam a incerteza acima ou abaixo do valor médio da potência recebida na quadrícula encontram-se representados na figura 23.

O histograma correspondente à avenida Silva Jardim encontra-se na figura 24, onde se encontram destacados os casos em que houve falha na recepção em HD.

Ao comparar os dois trechos, percebe-se que:

1. os desvios-padrão encontrados são pequenos, da ordem de 2,5dB;
2. há uma diferença significativa, da ordem de 20dB, entre os valores médios de potência recebida nas duas avenidas;

Como se trata de uma região urbana densa, especialmente na avenida Silva Jardim, é provável que o sinal recebido no nível da rua, através de uma antena omnidirecional, seja proveniente de uma variedade de direções e percursos, o que acaba por torná-lo razoavelmente constante em amplitude, de modo que o desvio-padrão por quadrícula não é elevado. Tudo se passa de forma análoga a um campo sonoro dentro de um ambiente delimitado, fenômeno denominado *campo reverberante* em Acústica (KUTTRUFF, 1991).

É preciso lembrar que o sinal recebido tem uma faixa relativamente larga (6MHz); o *fading* de multipercurso pode ocorrer sobre algumas subportadoras, mas não sobre toda a faixa do sinal. Quando isso ocorre, o sistema de correção de erros recupera a informação que seria perdida pelo enfraquecimento de algumas das subportadoras. Essa pode ser uma das causas de o limiar mínimo de recepção em HD encontrado na prática ter sido de -72dBm , pior do que o

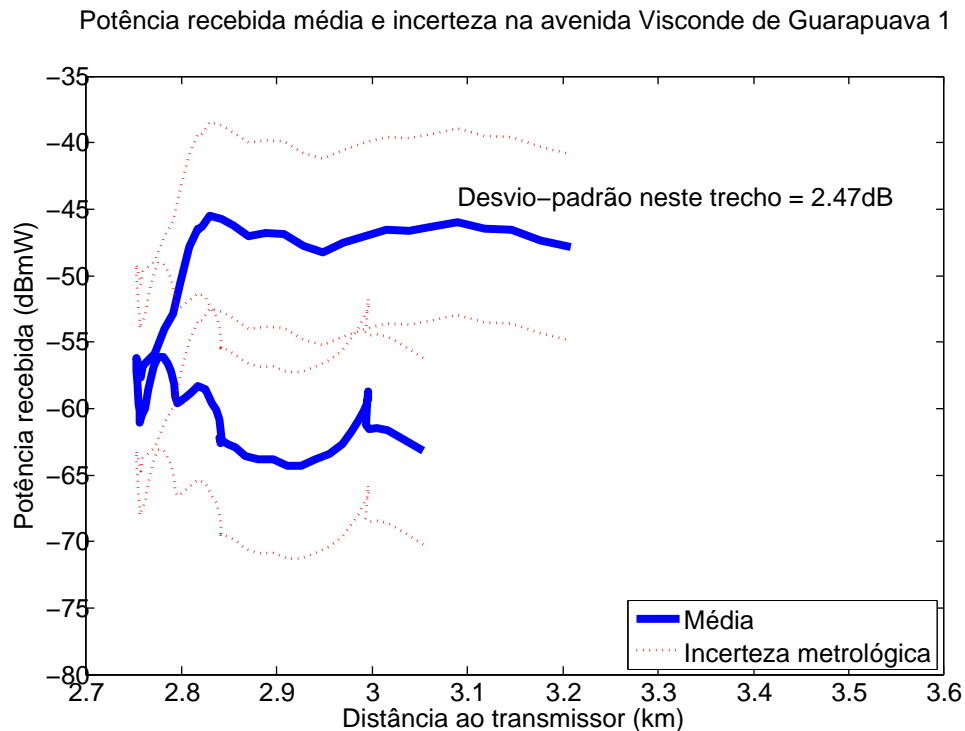


Figura 20: Valor médio (linha espessa) acrescido e subtraído da incerteza (linhas pontilhadas) da potência recebida por quadrícula na avenida Visconde de Guarapuava, primeira passagem. Como a avenida não é paralela à direção de propagação, pode haver quadrículas diferentes com distâncias iguais ao transmissor.

medido em laboratório, de -77dBm . Durante os ensaios, foi possível observar a ocorrência de recortes no espectro exibido no analisador de espectro, os quais se alteravam em profundidade e em frequência à medida que o veículo se deslocava. Essa constatação experimental parece comprovar que o *fading* de multipercurso age apenas sobre algumas subportadoras, e não sobre toda a faixa do sinal HD.

Quanto à atenuação do sinal em cerca de 20dB ao passar da avenida Visconde de Guarapuava para a Silva Jardim, é razoável atribuí-la à presença de prédios altos, implantados entre as duas vias. Como as ruas são aproximadamente perpendiculares ao percurso de propagação, a linha de construções altas funciona como um muro, mais efetivo ainda quando as medições são tomadas no nível do solo. Quando se comparam os histogramas das avenidas Guarapuava (figura 21) e Silva Jardim (figura 24), percebe-se que os valores de potência recebida nessa última agrupam-se em torno de valores mais baixos, o que parece confirmar a atenuação causada pelas construções altas permitidas pelo zoneamento da cidade de Curitiba entre as duas vias.

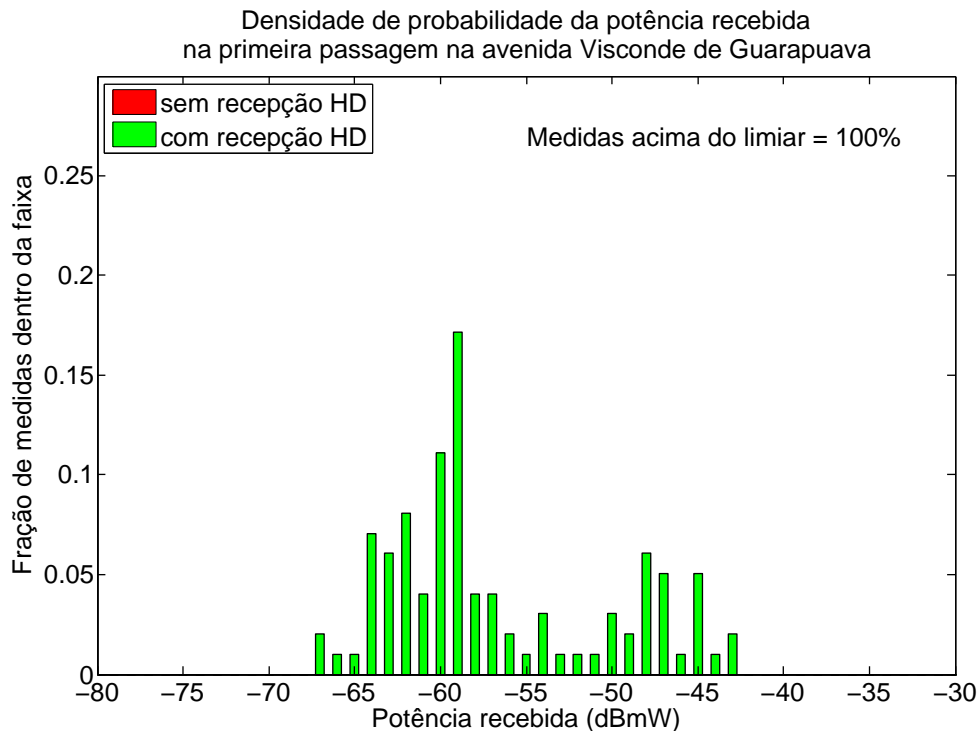


Figura 21: Fração do número total de medidas no trecho que se encontra dentro da faixa de potência especificada pela abscissa de cada barra na avenida Guarapuava, primeira passagem. Barras verdes significam recepção HD; barras vermelhas assinalam falhas na recepção.

5.1.3 REGIÃO SUBURBANA

Nos trechos enquadrados como região suburbana percorridos durante os ensaios, percebem-se as seguintes diferenças em relação aos trechos em região urbana e urbana densa:

1. a altura média dos prédios às margens da via percorrida é menor;
2. a topografia apresenta uma parte com cotas mais baixas, sujeita a sombreamento do sinal;
3. a distância ao transmissor é da ordem de 5km, contra 3km para os demais trechos;

Como consequência, a potência recebida é um pouco menor, há a possibilidade de o sinal se refletir em obstáculos mais distantes (porque mais visíveis), e existem locais com recepção mais fraca por efeito do sombreamento causado pelo relevo.

A figura 10 da subseção 3.3.1 já apresentou um mapa da cidade, sobre o qual estão plotados os pontos de medição registrados no primeiro trecho percorrido na avenida Canadá, trecho classificado como suburbano na tabela 5. O valor médio da potência recebida em cada quadrícula, juntamente com as duas curvas que representam a incerteza acima ou abaixo do valor médio



Figura 22: Trajeto da primeira passagem na avenida Silva Jardim. Círculos vermelhos assinalam potência recebida abaixo do limiar.

Fonte: Adaptado de *Google Maps*

da potência recebida na quadrícula, encontram-se representados na figura 25. O histograma correspondente é o da figura 26.

Conforme já comentado no início da seção 5.1, a Recomendação ITU-R P.1546-1 (ITU, 2003) supõe que a distribuição de intensidades de campo medianas em ambientes urbanos e suburbanos é aproximadamente lognormal (gaussiana em dB). Embora os histogramas encontrados nas medições não tenham uma aparência exatamente gaussiana, foi aplicado o método preconizado pela ITU-R P.1546-1 e apresentado em 3.2.1 para verificar se haveria uma diferença significativa entre o valor de potência recebida superado em 50% das localidades ($P(50, 50)$) e aquele superado em 90% delas ($P(90, 50)$) calculado segundo a Recomendação ITU-R P.1546-1, com as equações (1) a (6) de 3.2.1. A comparação pode ser vista na figura 27, na qual foi também assinalado o valor do limiar de recepção em alta definição, tudo referente ao trecho do primeiro afastamento na avenida Canadá.

A curva $P(90, 50)$ da figura 27 é um avaliação teórica, calculada com o modelo gaussiano da Recomendação ITU-R P.1546-1. A partir da observação apenas dessa curva, é possível concluir que, para assegurar que em 90% das localidades o sinal recebido fique acima do limiar naquele trecho, seria necessário aumentar a potência de transmissão entre 3 e 4 dB. Todavia, os valores efetivamente medidos e representados no histograma da figura 26 mostram que houve cobertura HD em mais de 93% das localidades, fato que pode ser interpretado como mais uma indicação da importância de medir.

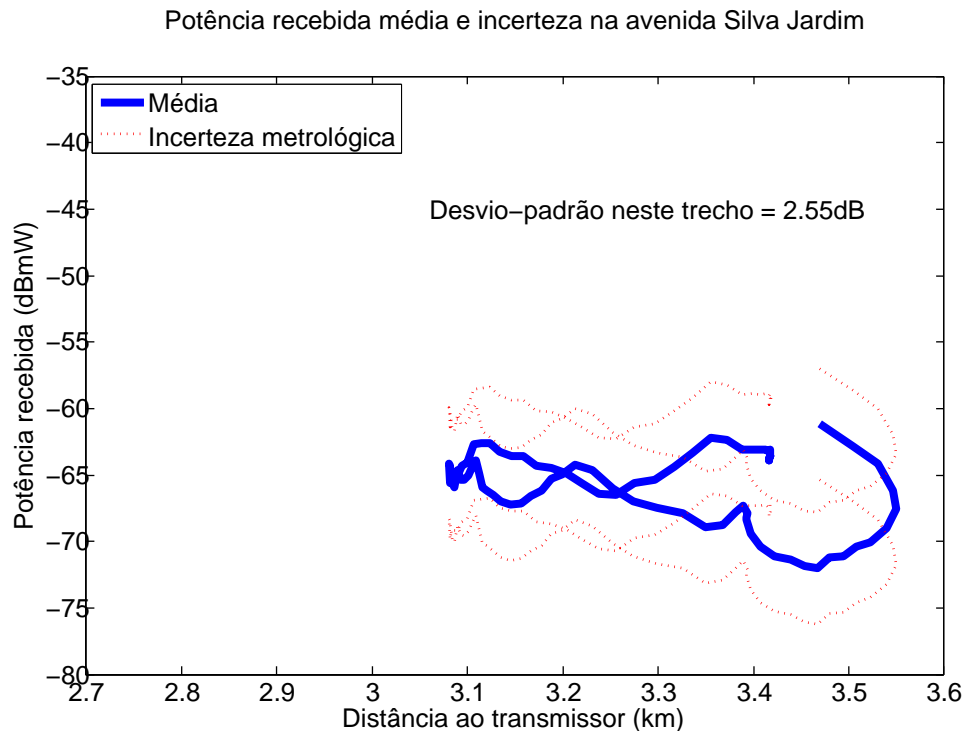


Figura 23: Valor médio (linha espessa) acrescido e subtraído da incerteza (linhas pontilhadas) da potência recebida por quadrícula na avenida Silva Jardim. Como a avenida não é paralela à direção de propagação, pode haver quadrículas diferentes com distâncias iguais ao transmissor.

5.2 MULTIPERCURSO

A qualidade da recepção de TV analógica nos grandes centros sempre foi prejudicada pelas imagens secundárias criadas a partir de réplicas do sinal atrasadas no tempo, consequência da multiplicidade de percursos possíveis para a propagação eletromagnética em ambiente urbano. Não é sem fundamento, portanto, considerar os efeitos do multipercurso sobre a TV digital. Para isso, foi aproveitada a capacidade do analisador de espectro empregado nos ensaios de registrar a resposta impulsiva do canal.

Uma ideia intuitiva de como o canal responde a um impulso pode ser formada a partir da figura 18, da subseção 4.3.2. Cada versão do sinal, propagada por diferentes percursos, fica representada por sua amplitude e por seu retardo, ambos medidos em relação a uma referência. A referência adotada nos ensaios foi a réplica *mais intensa* do sinal, que não é necessariamente a primeira a chegar. Consequentemente poderá haver retardos com tempos negativos, se chegarem versões do sinal *antes* da réplica mais intensa adotada como referência. Esses casos são, às vezes, denominados de *pré-ecos*. É importante notar que a existência de um único retardo negativo é suficiente para confirmar que o sinal recebido em visada direta não foi o mais intenso.

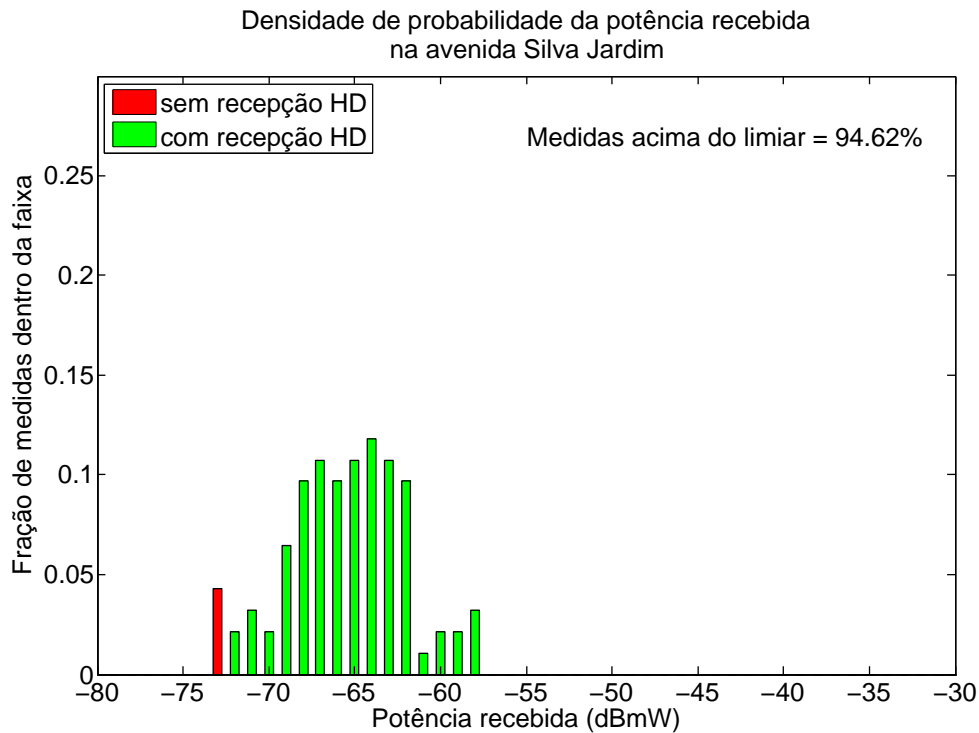


Figura 24: Fração do número total de medidas no trecho que se encontra dentro da faixa de potência especificada pela abcissa de cada barra na avenida Silva Jardim. Barras verdes significam recepção HD; barras vermelhas assinalam falhas na recepção.

A amplitude de cada réplica, por sua vez, é medida em relação à referência, arbitrariamente considerada como 0dB. Todas as demais terão amplitude negativa em dB, porque são medidas em relação à versão mais intensa que chegou. O conjunto de potências e retardos relativos de N réplicas do sinal propagadas por múltiplos caminhos pode ser denominado perfil de ecos (RAP-PAPORT, 2002).

O equipamento utilizado nas medições tem capacidade para registrar até dez réplicas ($N=10$). Portanto, cada uma das 1580 medidas tomadas durante o ensaio tem associada a si vinte valores relativos a ecos. Dez deles são as intensidades, em dB, com relação ao mais intenso. Os outros dez valores são os retardos, em microssegundos, relativamente também ao eco mais intenso.

Com o fim de resumir a informação contida nesses 31.600 números, utilizou-se a formulação da Recomendação ITU-R P.1407 *Multipath Propagation and Parameterization of its Characteristics* (ITU, 1999), os assim chamados ‘retardo médio’ T_D e ‘espalhamento rms dos retardos’ S , apresentada a seguir:

$$T_D = \frac{\sum_{i=1}^N P_i t_i}{\sum_{i=1}^N P_i} \quad (8)$$

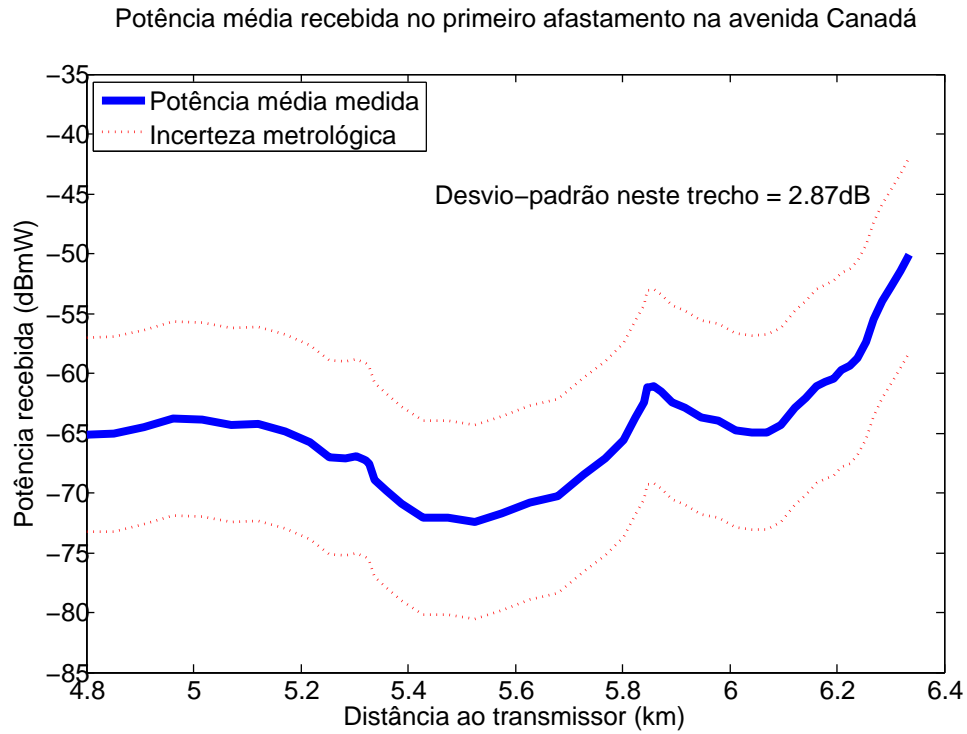


Figura 25: Valor médio (linha espessa) acrescido e subtraído da incerteza (linhas pontilhadas) da potência recebida por quadrícula na avenida Canadá, primeira passagem.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N P_i t_i^2}{\sum_{i=1}^N P_i} - \frac{(\sum_{i=1}^N P_i t_i)^2}{(\sum_{i=1}^N P_i)^2}} \quad (9)$$

onde:

- N = número de versões multipercurso consideradas;
- P_i = potência da i -ésima versão multipercurso;
- t_i = retardo da i -ésima versão multipercurso.

Observe-se que o retardo médio T_D é uma média ponderada dos N retardos levados em consideração (em nosso experimento foram dez). O peso de cada retardo na formação da média é a sua potência relativa. É uma medida de tendência central, e pode ter valor negativo. O espalhamento *rms* S é uma medida de dispersão, e avalia o quanto os retardos estão espalhados no tempo.

Durante o ensaio, foi percebido que o analisador de espectro só conseguia registrar o perfil de ecos quando a velocidade de deslocamento ficasse abaixo de um valor máximo. Esse valor é inferior a 20km/h, e foi avaliado em aproximadamente 10km/h com base no velocímetro

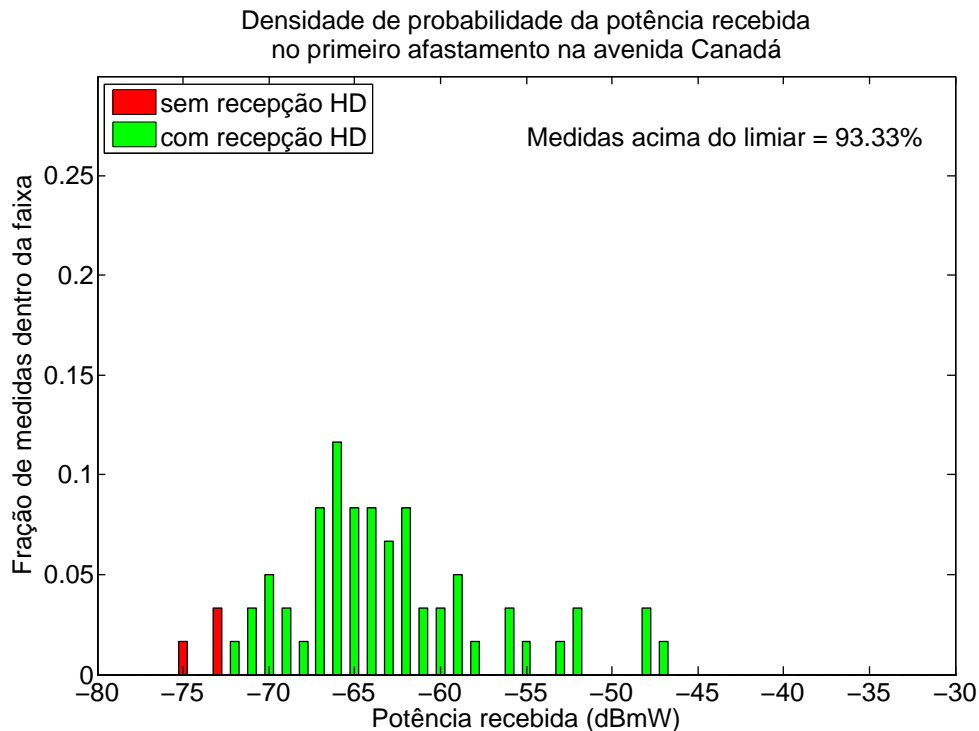


Figura 26: Fração do número total de medidas no trecho que se encontra dentro da faixa de potência especificada pela abcissa de cada barra na avenida Canadá, primeiro afastamento. Barras verdes significam recepção HD; barras vermelhas assinalam falhas na recepção.

do veículo. Devido às condições de tráfego, nem sempre foi possível manter velocidade de deslocamento compatível com o registro. Por isso, algumas partes dos trechos não têm registro do perfil de ecos, de modo que as curvas apresentam interrupções.

Para comparar o comportamento em diferentes regiões, a figura 28 mostra um exemplo de valores de T_D , calculados com 8 e de S , calculados com 9 para um trecho de região suburbana, enquanto a figura 29 apresenta a informação correspondente a um trecho de região urbana.

É possível perceber que os valores de retardo são maiores em região suburbana do que nos trechos urbanos, ao contrário do que se poderia esperar. A causa provável é que, nas regiões urbana e urbana densa, a presença de obstáculos elevados junto ao receptor impede que sinais refletidos de objetos mais distantes atinjam a antena de recepção no nível do solo. Por seu turno, a maior visibilidade permitida pelos prédios mais baixos dos trechos suburbanos permite receber ecos de objetos refletores mais distantes.

Outra observação que pode ser feita na figura 28, é que os retardos tendem a diminuir com o aumento da distância ao transmissor, porque a cota do terreno cresce com a distância nesse trecho, e permite maior visibilidade. Com ela, aumenta a intensidade do sinal em visada direta, o que acarreta uma diminuição do peso dos sinais retardados no cômputo do tempo médio,

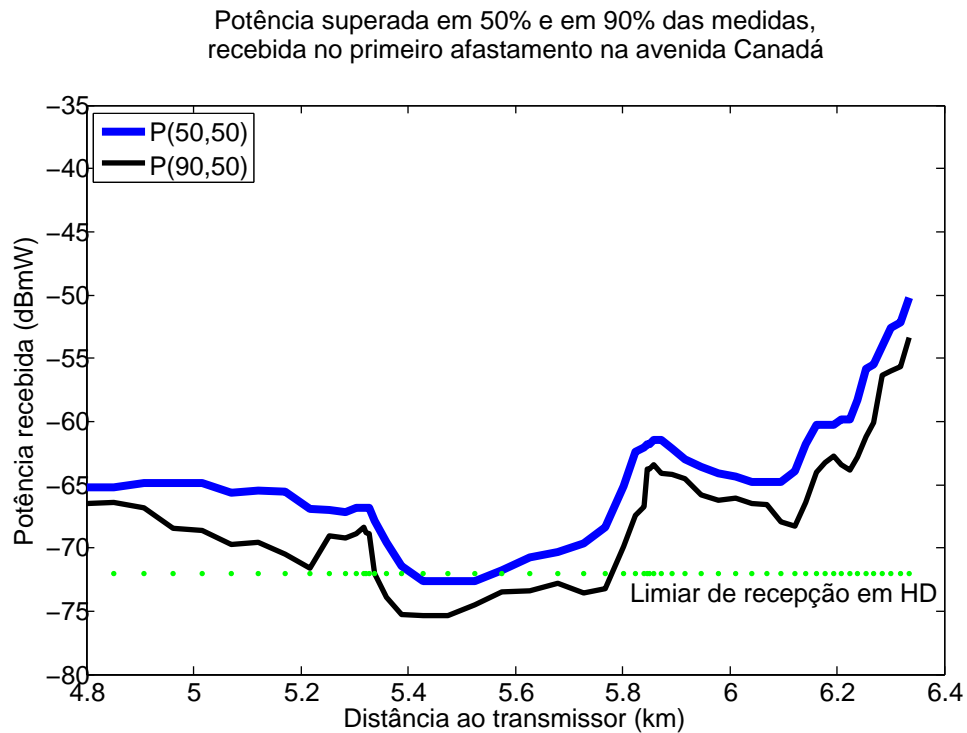


Figura 27: Valor mediano $P(50,50)$ (linha espessa) e valor superado em 90% das localidades $P(90,50)$ (linha fina) de potência recebida por quadrícula na avenida Canadá, primeira passagem.

causando a progressiva diminuição de T_D , de acordo com a equação (8).

Os dados experimentais mostram também que os valores de retardo médio encontrados na prática são pequenos (da ordem de $6\mu s$) quando comparados com o intervalo de guarda de $63\mu s$ utilizado na transmissão. É um indício de que o multipercurso perturba pouco o sinal de TV digital nas regiões investigadas, pelo menos enquanto não for utilizada uma rede de frequência única (SFN).

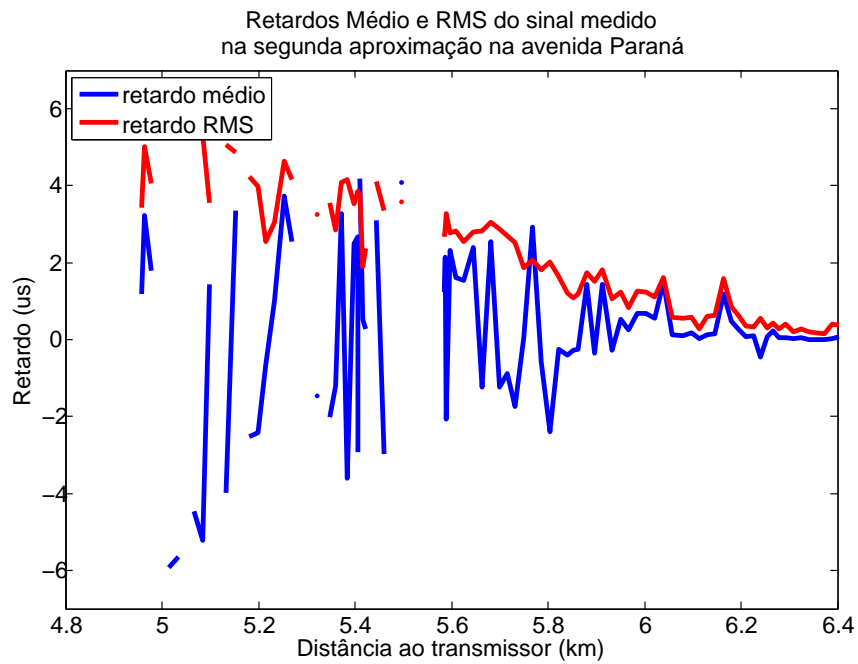


Figura 28: Valores de retardo médio (linha azul) e rms (linha vermelha), calculados segundo a Recomendação ITU-R P.1407 para a segunda aproximação na avenida Paraná, em região suburbana.

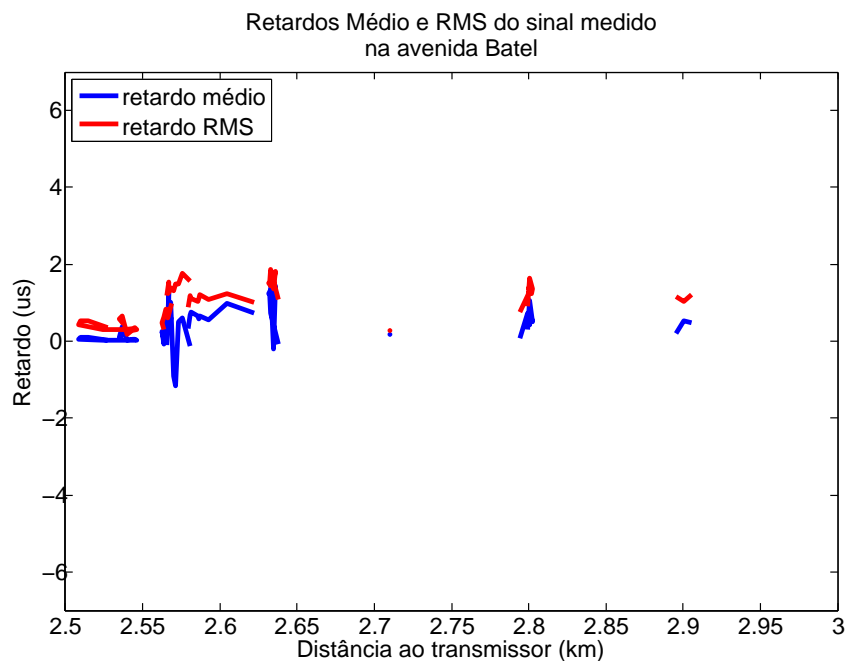


Figura 29: Valores de retardo médio (linha azul) e rms (linha vermelha), calculados segundo a Recomendação ITU-R P.1407 para o trecho das avenidas Benjamin Lins e Dr. Pedrosa, em região urbana.

6 RESULTADOS

Coletados e analisados os dados medidos, é oportuno reorganizar as informações de forma mais concisa, propósito perseguido nas seções subsequentes.

6.1 COMPARAÇÃO COM MODELOS

Conforme já exposto em 3.2.1, os cálculos de propagação procuram prever o valor *mediano* do sinal. Para verificar a concordância entre os valores calculado e medido, foi elaborada a figura 30. Ali estão comparados os valores médios das medições por quadrícula com o que prevê a Recomendação ITU-R P.1546-1 (ITU, 2003). Essa Recomendação foi adotada com *status* de norma pela Anatel (ANATEL, 1991).

Se considerarmos que o valor mediano é aquele que é superado por metade das medições, pode-se dizer que a previsão é boa. Sua falha é não apresentar os detalhes da variação do sinal.

Após as medições de campo, a equipe técnica da estação que serviu de fonte de sinal de teste para os ensaios utilizou um *software* comercial, denominado EDX (LLC, 2008), que dispõe de uma variedade de modelos, à escolha do utilizador. Essa ferramenta gerou previsões de potência recebida segundo 32 modelos diferentes, para comparar com as medições. O programa produziu curvas de potência recebida *versus* distância e, por meio de cálculos internos, avaliou o erro das previsões. A denominação dos modelos e a acurácia de suas previsões estão na tabela 7.

Um modelo que apresentou boa concordância com os valores medidos na avenida Canadá foi o popular modelo de Okumura-Hata, comparado com o experimento na figura 31.

Como no caso anterior, a previsão de valores medianos é boa, mas não informa quanto às variações. Com o objetivo de melhorar esse detalhamento, o *software* sofisticou o modelo de Hata, a ele acrescentando as perdas por difração em obstáculos múltiplos, calculadas com base no relevo com o método de Epstein-Peterson. Por essa técnica, cada obstáculo é tratado individualmente, com o obstáculo anterior considerado como transmissor, e o obstáculo seguinte como receptor (LLC, 2008). Os resultados dessa sofisticação podem ser vistos na figura 32.

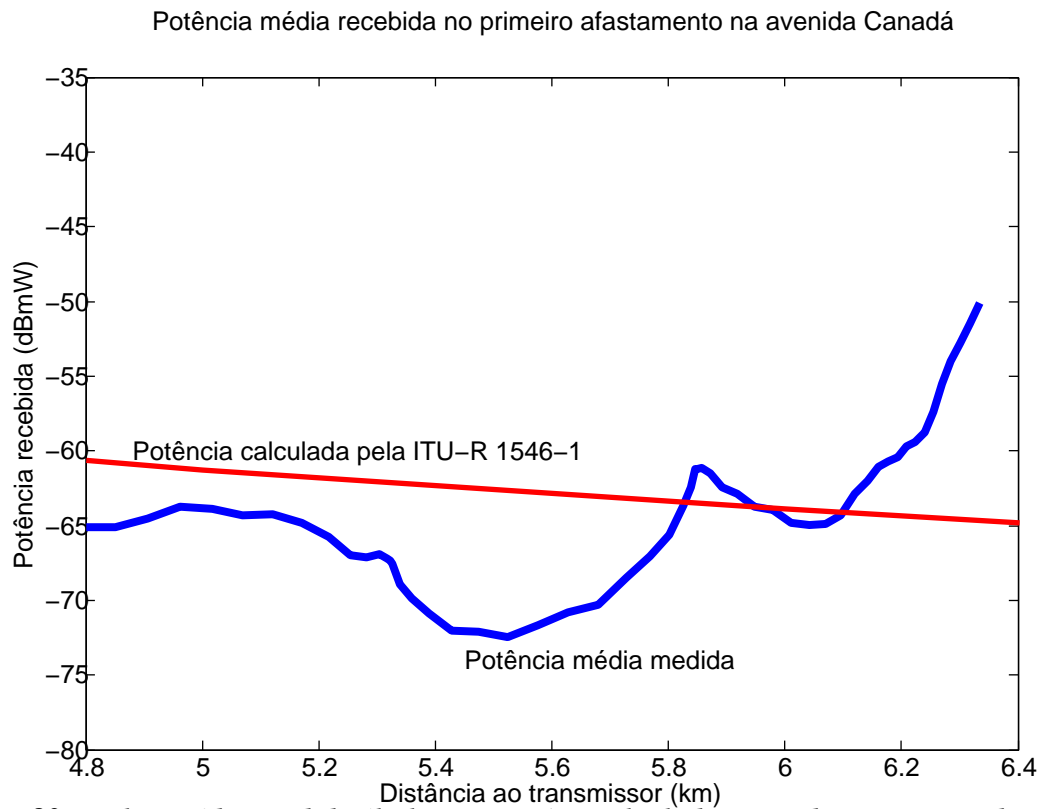


Figura 30: Valor médio medido (linha espessa) e calculado segundo a Recomendação ITU-R P.1546-1 (linha fina) da potência recebida por quadrícula na avenida Canadá, primeiro afastamento.

Embora o modelo acerte ao prever uma diminuição do sinal devida à perda por difração, erra na localização dessa região de sinal fraco. É possível que esse desvio se deva ao fato de o modelo considerar apenas o relevo do terreno, e não as construções nele implantadas.

Há também modelos que fizeram uma previsão bastante imprecisa. A título de exemplo, tomamos o modelo denominado Free space + RMD, que acrescenta as perdas por difração à perda normal de espaço livre. Suas previsões podem ser comparadas às medições na figura 33.

6.2 COBERTURA

No capítulo 5 os diversos trechos foram analisados sob vários aspectos. Um resumo dos resultados pode ser encontrado na tabela 6.

6.3 ASPECTOS PRÁTICOS

A configuração do material necessário às medições já foi descrita na subseção 4.3.2. O item mais caro é o analisador de espectro, encarregado de medir a potência e de registrar o perfil de

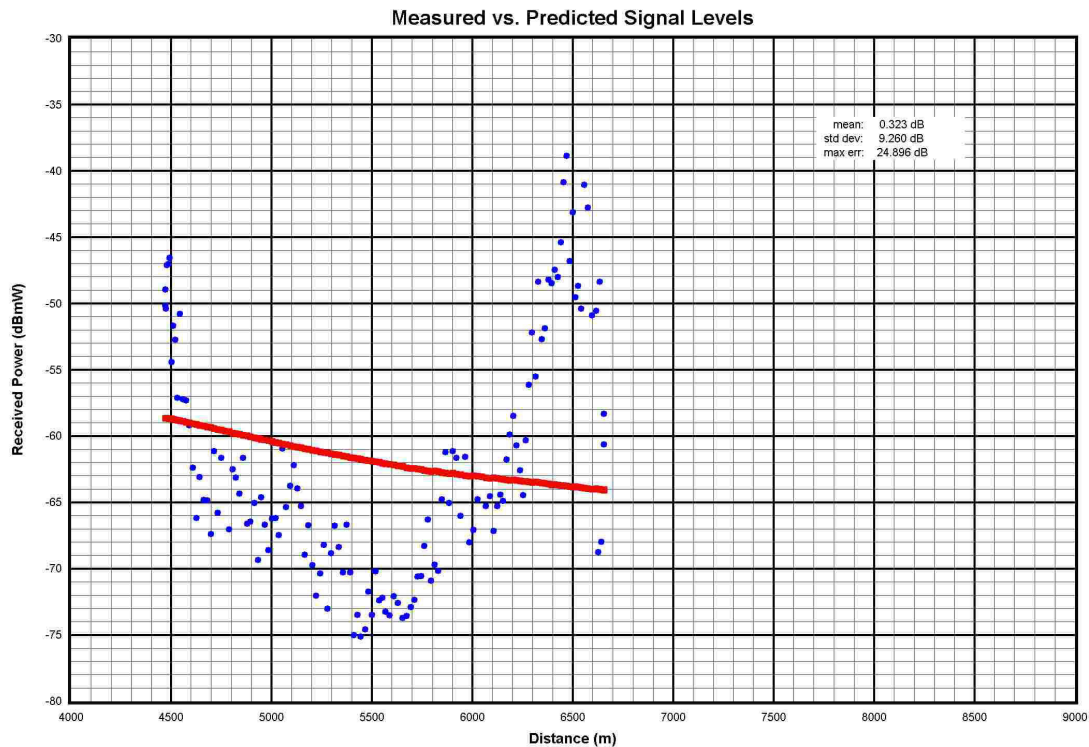


Figura 31: Comparação entre os valores medidos (círculos azuis) e a previsão do software EDX (quadrados vermelhos) segundo o modelo Okumura-Hata-suburban (sem difração), na avenida Canadá. Erro médio=0,323dB; desvio-padrão do erro=9,26dB; erro máximo=24,89dB.

Fonte: (LLC, 2008)

ecos. Também foi constatado, na seção 5.2, que a importância de medir o perfil de ecos não é preponderante, pelo menos quando não há uso de SFN. Portanto, é concebível substituir o analisador de espectro por um equipamento de menor custo, capaz de medir a potência recebida, mesmo sem registrar o perfil de ecos. Um sintonizador poderia medir a potência a partir de uma curva de calibração de seu AGC (*controle automático de ganho*), solução já adotada em (AKAMINE et al., 2010). A incerteza na medição de potência efetuada com o AGC de um sintonizador certamente não será tão estreita quanto o 1,0dB que representa a incerteza do analisador de espectro utilizado (ROHDE&SCHWARZ, 2011). Não obstante, em face da variabilidade do mensurando, os valores obtidos com esse método mais econômico ainda podem atender aos propósitos da medição.

O GPS e o *notebook* são equipamentos comuns no comércio, e também o inversor para a alimentação, de modo que o custo da configuração pode permanecer na faixa de alguns milhares de reais.

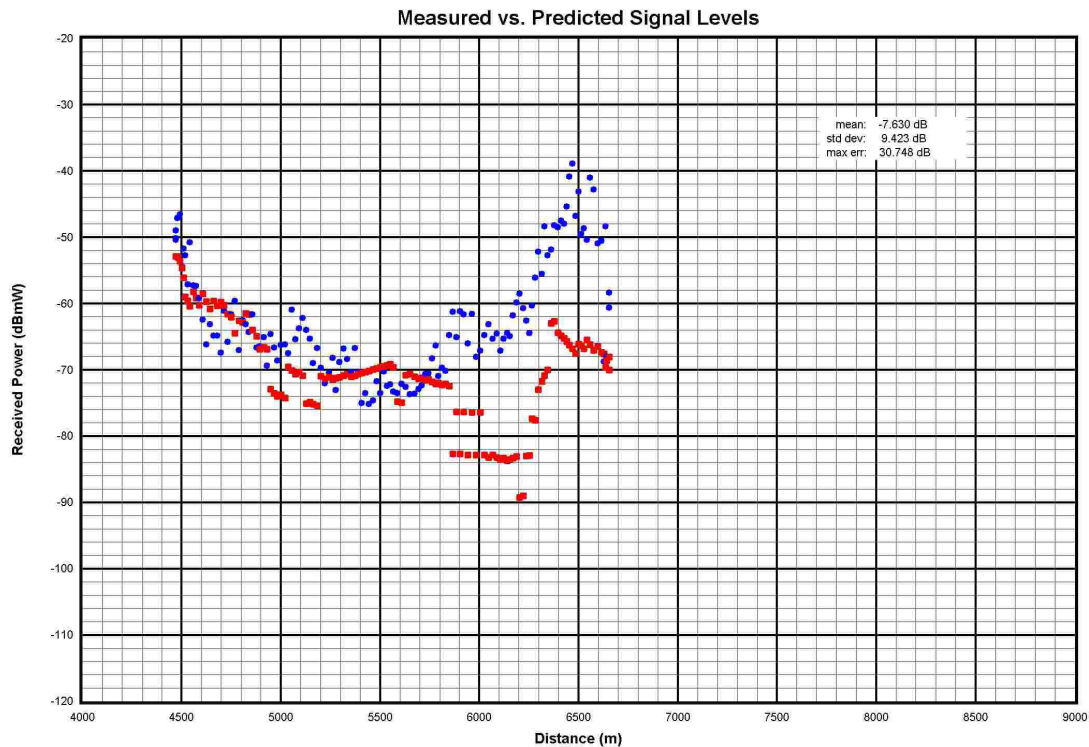


Figura 32: Comparação entre os valores medidos (círculos azuis) e a previsão do software EDX (quadrados vermelhos) segundo o modelo Hata-extended-suburban, na avenida Canadá. Erro médio=-7,63dB; desvio-padrão do erro=9,42dB; erro máximo=30,74dB.

Fonte: (LLC, 2008)

Os equipamentos podem ser embarcados em veículo de praticamente qualquer porte, não é necessário o emprego de uma *van* de uso dedicado.

O levantamento de campo pode ser dimensionado a partir do tamanho estipulado para a quadrícula e do número de medidas que se deseja obter dentro de cada uma delas. Para uma quadrícula com 150m de lado, cada quilômetro de percurso cobre uma área de 0,15 quilômetros quadrados. Uma área urbana com cem quilômetros quadrados pode ser pesquisada com 667km rodados. A uma velocidade média de 20km/h, e com 6h de levantamento por dia, é possível concluir a campanha em menos de seis dias, com uma taxa da ordem de 18 quilômetros quadrados por dia.

As medidas analisadas neste trabalho foram coletadas com tempo ensolarado (15/6/2010), temperatura ambiente a 15,5 graus Celsius. As primeiras análises foram reunidas em artigo apresentado no Seminário Acadêmico Técnico Científico em 27/8/2010 do Congresso de Tecnologia de Televisão (SET 2010), e posteriormente publicado na Revista de Radiodifusão da SET, edição 4.

Tabela 6: Resultados por região

Região	Nome do trecho	Desvio-padrão (dB)	% recepção acima do limiar
Suburbana	Canadá afastamento 1	2,87	93,33
Suburbana	Canadá afastamento 2	2,65	80
Suburbana	Paraná aproximação 1	2,76	87,78
Suburbana	Paraná aproximação 2	2,78	86,79
Urbana	Guarapuava passagem 1	2,47	100
Urbana	Guarapuava passagem 2	2,72	100
Urbana	Batel e Dr. Pedrosa	2,82	100
Urbana densa	Silva Jardim início	1,76	95
Urbana densa	Silva Jardim passagem 1	2,55	94,62
Urbana densa	Dulcídio	6,09	100
Urbana densa	Deodoro e Perneta	2,54	100

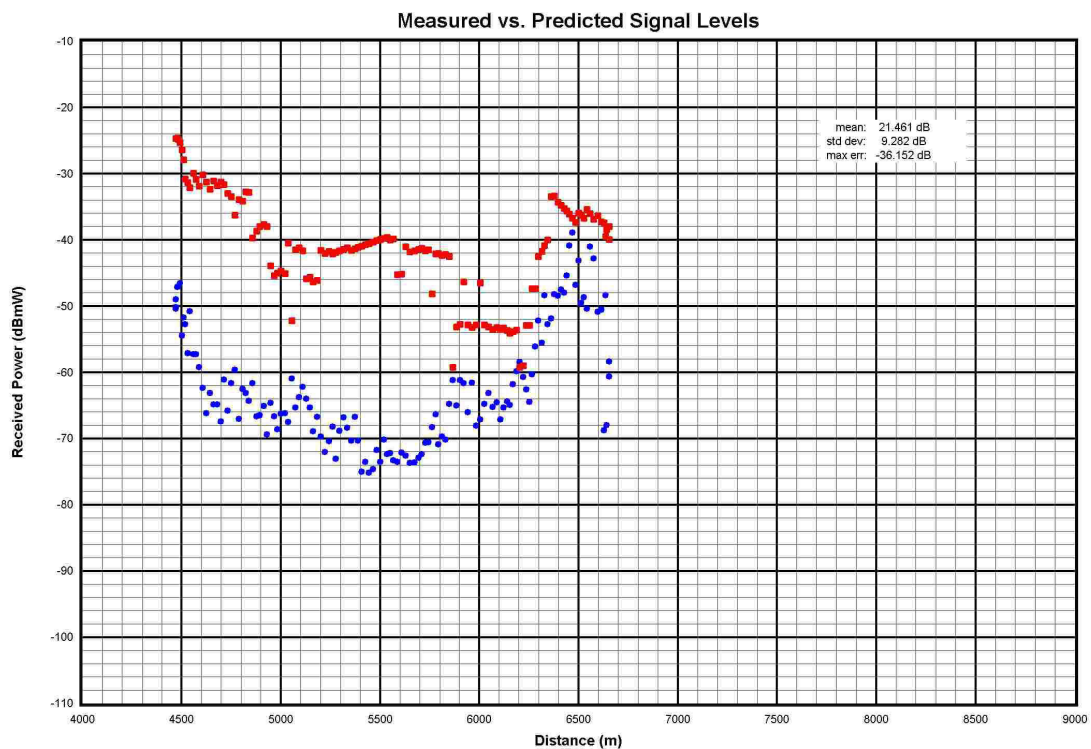


Figura 33: Comparação entre os valores medidos (círculos azuis) e a previsão do software EDX (quadrados vermelhos) segundo o modelo Free space+RMD, na avenida Canadá. Erro médio=21,46dB; desvio-padrão do erro=9,28dB; erro máximo=-36,15dB.

Fonte: (LLC, 2008)

Tabela 7: Modelos de propagação do *software* EDX usados na Av. Canadá

Modelo de Propagação	Erro Médio (dB)	Desvio-Padrão (dB)
Anderson 2D v1.00	15.54	10.22
FCC - EDX	31.22	9.65
FCC - FCC	31.33	9.69
FCC - Pt22	31.22	9.65
FCC + RMD	21.81	9.60
Free Space + RMD	21.46	9.28
Hata-extended-open	14.59	9.33
Hata-extended-suburban	-7.63	9.42
Hata-extended-urban	-12.68	9.33
ITU-R 1546 cold sea curves with delta H	41.90	9.11
ITU-R 1546 cold sea curves without delta H	41.90	9.11
ITU-R 1546 Land curves with delta H	27.86	9.34
ITU-R 1546 Land curves without delta H	27.86	9.34
ITU-R 1546 Warm sea curves with delta H	41.90	9.11
ITU-R 1546 Warm sea curves without delta H	41.90	9.11
ITU-R 370 Cold sea curves with delta H	41.97	9.12
ITU-R 370 Cold sea curves without delta H	41.97	9.12
ITU-R 370 Land curves with delta H	41.97	9.12
ITU-R 370 Land curves without delta H	41.97	9.12
ITU-R 370 Warm sea curves with delta H	41.97	9.12
ITU-R 370 Warm sea curves without delta H	41.97	9.12
ITU-R 370 + RMD Cold sea curves with delta H	32.14	8.60
ITU-R 370 + RMD Cold sea curves without delta H	32.14	8.60
ITU-R 370 + RMD Land curves with delta H	32.14	8.60
ITU-R 370 + RMD Land curves without delta H	32.14	8.60
ITU-R 370 + RMD Warm sea curves with delta H	32.14	8.60
ITU-R 370 + RMD Warm sea curves without delta H	32.14	8.60
Longley rice v1.2.2	17.64	10.30
Okumura-Hata-open	23.95	9.50
Okumura-Hata-suburban	0.323	9.26
Okumura-Hata-urban	-3.32	9.50
TIREM - EDX	17.13	10.03

7 CONCLUSÕES

Consideradas as particularidades e complexidades peculiares à medição da cobertura de TV digital, em tudo semelhantes à determinação da área coberta por outros sistemas sem-fio, as seções a seguir embasam a convicção de que o método estudado é válido, mesmo apresentando limitações e possibilidades de aperfeiçoamento futuro.

7.1 VIABILIDADE DO MÉTODO

As considerações feitas na seção 6.3 permitem admitir que o método é viável, em termos de custos e de prazos. A principal vantagem do método experimental porém é a delimitação precisa das áreas de recepção difícil para que as correções possam ser encaminhadas, atributo que os métodos teóricos ainda não conseguiram reproduzir. Adicionalmente, o levantamento de campo pode confirmar os limites da cobertura teórica negociada com os órgãos de administração do espectro, bem como estimular a geração de receitas a partir do interesse dos anunciantes.

7.2 DETERMINAÇÃO DA COBERTURA REAL

Mesmo dentro das limitações de custo e de prazo consideradas na seção 6.3, a metodologia aqui empregada fornece aos teledifusores uma informação muito próxima da cobertura real de suas estações, já consideradas as influências do relevo, das construções, do multipercurso, das interferências e do ruído radioelétrico, condições difíceis de reproduzir em simulações, em especial simultaneamente.

7.3 COERÊNCIA DOS MODELOS

A concordância entre as previsões dos vários modelos e as medições experimentais foi considerada na seção 6.1. A partir dos dados analisados, é possível formar a convicção de que os modelos, em sua maioria corretos ao prever valores medianos do sinal, não apresentam a mesma precisão ao quantificar e ao localizar as áreas de recepção mais difícil. É possível que a

acurácia dos modelos se aperfeiçoe, à medida em que os *softwares* incorporem aos seus bancos de dados informações mais detalhadas sobre a localização e as propriedades eletromagnéticas dos obstáculos. Permanece a dúvida se buscar essas informações mais detalhadas não supera, em dificuldade, a medição direta do sinal de interesse.

7.4 A CONFIGURAÇÃO DO ESQUEMA DE MODULAÇÃO

A concepção do sinal de TV digital permite ao teledifusor uma ampla gama de opções no que diz respeito ao esquema de modulação. A configuração utilizada nos ensaios, e apresentada na tabela 3, pode ser alterada, para atingir objetivos específicos de serviço, como recepção móvel, por exemplo. Validar essas escolhas é mais um emprego que pode ser dado ao método aqui utilizado.

7.5 LIMITAÇÕES

Embora não tenha sido implementada nas medições realizadas, a capacidade de avaliar a recepção em mobilidade é uma das possibilidades da metodologia apresentada. Basta que o veículo possa se movimentar nas velocidades exigidas pelo teste, e que o sistema de registro permaneça operacional nessa situação, para que o comportamento em mobilidade possa ser detalhadamente avaliado. Já a recepção *indoor*, que é uma informação importante para o teledifusor, não pode ser aferida pelo método estudado.

7.6 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O grande diferencial da TV digital terrestre é que o equipamento que a recebe não precisa ter fios. A mobilidade e a portabilidade são vantagens competitivas importantes quando comparada a outras modalidades (IPTV, satélite, cabo). Há indícios fortes de que o sistema brasileiro de TV digital possibilita a recepção móvel, mesmo em alta definição, desde que amparada por diversidade espacial (AKAMINE et al., 2010).

Nesse contexto, seria interessante esclarecer em trabalhos futuros:

- as antenas internas;
- o comportamento do sinal dentro de prédios, a partir daquele medido no nível da rua;
- a variação do sinal com a altura, no exterior e no interior de prédios urbanos.

Um desdobramento mais ambicioso da metodologia automatizada de medição validada neste trabalho seria a criação do que poderia ser denominado um ‘mapa-rádio’ da região sob estudo. Em vez de medir apenas *um* canal de televisão digital terrestre, informações adicionais poderiam ser coletadas, limitadas apenas pela capacidade do equipamento em uso. Nelas poderiam ser incluídas:

- outros canais de TV, digitais ou analógicos;
- emissoras de FM (*frequência modulada*);
- emissoras de AM (*amplitude modulada*);
- estações radiobase de telefonia celular;
- outros sinais cuja intensidade e expectativa de permanência justifiquem seu registro em um banco de informações-rádio.

O conjunto de informações-rádio poderia ser associado a um sistema de dados geográficos, o que criaria um ‘mapa-rádio’ da região. Ele permitiria que cada radiodifusor conhecesse detalhadamente a área de sua cobertura. Propiciaria aos órgãos de administração do espectro um conhecimento muito mais detalhado da utilização desse recurso em sua região de responsabilidade, embasando decisões sobre interferências, ou a respeito de áreas que necessitem do apoio de *gap-fillers*.

O uso mais desafiador de um ‘mapa-rádio’ porém, talvez seja possibilitar um sistema de radiolocalização de baixo custo, independente de satélites, capaz de operar *dentro* de construções e em plataformas móveis, e que tem a parte mais cara de sua infra-estrutura, os transmissores, já implantada.

REFERÊNCIAS

- ABNT. **NBR 15601:2007** **Televisão digital terrestre - Sistema de Transmissão.** 2007.
- ABNT. **NBR 15602-1:2007** **Televisão digital terrestre - Codificação de vídeo, áudio e multiplexação Parte 1: Codificação de vídeo.** 2007.
- ABNT. **NBR 15606-4:2010** **Ing Digital terrestrial television - Data coding and transmission specification for digital broadcasting Part 4: Ginga-J - The environment for the execution of procedural applications.** 2010.
- ABNT. **NBR 15606-2:2011** **Ing Digital terrestrial television - Data coding and transmission specification for digital broadcasting Part 2: Ginga-NCL for fixed and mobile receivers - XML application language for application coding.** 2011.
- ABNT. **NBR 15606-5:2011** **Ing Digital terrestrial television - Data coding and transmission specification for digital broadcasting Part 5: Ginga-NCL for portable receivers - XML application language for application coding.** 2011.
- ADAMIAN, A. **ATSC A/53 with 8-VSB.** 2010. Web Page. Acesso em: 31 mar. 2011. Disponível em: <<http://ecee.colorado.edu>>.
- AKAMINE, C. et al. Field Trials for Brazilian DTV Using Space Diversity. **2010 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB)**, p. 1 – 11, March 2010. Shanghai.
- ALBERTAZZI, A. R. d. S. A. **Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial.** 1. ed. Barueri SP: Manole, 2008. ISBN 978-85-204-2116-1.
- ANATEL. **N - 002/91 - Norma para Determinação da Intensidade de Campo em Canais de VHF e UHF.** 1991. Anexo à Portaria N° 053, de 07 de junho de 1991.
- ANATEL. **Anexo à Resolução 398 de 7 de abril de 2005.** Abr 2005.
- ANATEL. **Descrição do Sistema - Características Técnicas de Operação da Estação 690881088.** 2006.
- ARIB. Video Coding. In: **Digital Terrestrial Television Broadcasting.** [S.l.]: ARIB, 2009, (Harmonization Documents). p. 4. ABNT NBR 15602-1 and ARIB STD- B32.
- ATSC. **A/52:2010 Digital Audio Compression Standard (AC-3, E-AC-3).** 1776 K Street, N.W., Suite 200 Washington, D.C. 20006, November 1994.
- ATSC. **A/53: ATSC Digital Television Standard, Parts 1 - 6.** 2007.
- BARON, S. **The Digital Terrestrial Television Broadcasting (DTTB) Standard.** September 2010. Web Page. Acesso em: 21 mar. 2011. Disponível em: <<http://www.ieeeahn.org>>.

BARTON, R. M. Australian Assessment of DTTB. In: OFFICE, D. P. (Ed.). **DVB-T Field Trials around the World**. [S.l.], 1999.

BEDICKS-JR., G. et al. Handheld Digital TV Performance Evaluation Method. **International Journal of Digital Multimedia Broadcasting**, v. 2008, p. 1 – 5, September 2008.

BRASIL. **Presidência da República. Decreto nº 4.901, de 26 de novembro de 2003**. Nov 2003.

BRASIL. **Ministério das Comunicações. Portaria nº 652 de 10 de outubro de 2006**. Out 2006.

BRASIL. **Ministério das Comunicações. Portaria nº 24 de 11 de fevereiro de 2009**. Fev 2009.

CASTELLANOS, P. V. G. et al. Measurements of Terrestrial Digital TV signals at two cities in South America. **IEEE 2010 Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)**, Barcelona, Apr 2010. E-ISBN: 978-84-7653-472-4 Print ISBN: 978-1-4244-6431-9.

CURITIBA. **Câmara Municipal. Lei nº 9.800, de 03 de janeiro de 2000**. Jan 2000.

DIBEG. **ANNEX - AA: Structure of ISDB-T System and its Technical Features**. [S.l.], 2010. Acesso em: 26 abr. 2011. Disponível em: <<http://www.dibeg.org/techp/feature/ANNEX-AA.pdf>>.

DIBEG. **Digital Terrestrial Television Broadcasting**. Tokyo, Feb 2010. Acesso em: 15 abr. 2011. Disponível em: <<http://www.dibeg.org/>>.

DIBEG. **Digital Broadcasting Experts Group**. March 2011. Web Page. Acesso em: 21 mar. 2011. Disponível em: <<http://www.dibeg.org/>>.

FARIAS, M.; CARVALHO, M.; ALENCAR, M. Digital Television Broadcasting in Brazil. **IEEE MultiMedia from IEEE Computer Society**, v. 15, n. 2, p. 64–70, April-June 2008.

INTEL. **Smart TV**. December 2010. Web Page. Acesso em: 21 dez. 2010. Disponível em: <<http://www.intel.com/inside/smarttv/>>.

ISO/IEC. **ISO/IEC 11172-3:1993 - Information Technology – Coding of Moving Pictures and Associated Audio for Digital Storage Media at up to about 1,5 Mbit/s – Part 3:Audio**. 1993. Acesso em: 13 abr. 2011. Disponível em: <<http://www.iso.org/>>.

ITU, R. S. G. **A Guide to Digital Terrestrial Television Broadcasting in the VHF/UHF Bands**. [S.l.], January 1996.

ITU, R. S. G. **ITU Recommendation ITU-R P.1407: Multipath Propagation and Parameterization of its Characteristics**. 1999.

ITU, R. S. G. **ITU Recommendation ITU-R P.1546-1: Method for Point-to-area Predictions for Terrestrial Services in the Frequency Range 30 MHz to 3000 MHz**. Geneva, 2003.

ITU, R. S. G. **ITU Recommendation ITU-R BT.1735: Métodos de Evaluación Objetiva de la Calidad de la Cobertura de las Señales de Radiodifusión de Televisión Digital Terrenal del Sistema B Especificado en la Recomendación UIT-R BT.1306**. Geneva: [s.n.], 2005.

- ITU, R. S. G. **ITU Recommendation ITU-R P.1406-1: Propagation Effects Relating to Terrestrial Land Mobile and Broadcasting Services in the VHF and UHF Bands**. Geneva: [s.n.], 2007.
- ITU, R. S. G. **ITU Recommendation ITU-R P.1546-3: Method for Point-to-area Predictions for Terrestrial Services in the Frequency Range 30 MHz to 3000 MHz**. Geneva, 2007.
- KUTTRUFF, H. **Room Acoustics**. Third edition. Crown House, Linton Road, Barking, Essex IG118JU, England: Elsevier Science Publishers LTD, 1991. 329 p.
- LLC, E. W. **EDX Signal: Comprehensive Engineering Software for Wireless Communication System Design**. v.10. Oregon USA, 10 2008. Rev. 018.
- LÉVY, Y. DVB-T - A Fresh Look at Single and Diversity Receivers for Mobile and Portable Reception. **EBU Technical Review**, p. 1–10, April 2004.
- MACKENZIE, U. P. Sistema de TV Digital. **Revista Mackenzie de Engenharia e Computação**, v. 5, n. 5, p. 13–96, 2004.
- MARTINS, R. A. TV Digital. In: UTFPR (Ed.). **Semana de Eletrônica**. Curitiba, 2010.
- MEGRICH, A. **Televisão Digital: Princípios e Técnicas**. 1. ed. São Paulo: Editora Érica Ltda., 2009. 336 p. CDD-384.550981.
- MIYOSHI, E. M.; SANCHES, C. A. **Projetos de Sistemas Rádio**. 2. ed. São Paulo: Editora Érica Ltda., 2002. 534 p. CDD-621.38415.
- PARKS, A. **Holiday Intentions**. November 2010. Web Page. Acesso em: 21 dez. 2010. Disponível em: <<http://www.parksassociates.com/blog/article/cdp-pr-nov10>>.
- PLUMB, G.; PULLEN, I. R.; TAIT, B. UK DVB-T Network Planning and Coverage Verification. **BBC Research and Development**, 1999.
- PULLEN, I. DTT Coverage Predictions - how they are made and tested. **BBC Research and Development**, 1999.
- PUTMAN, P. **Cable TV Socialism**. November 2010. Web Page. Acesso em: 21 dez. 2010. Disponível em: <<http://www.hdtvexpert.com/>>.
- RAPPAPORT, T. S. **Wireless Communications Principles and Practice**. 2. ed. NJ: Prentice Hall PTR, 2002. 707 p. (Prentice Hall Communications Engineering and Emerging Technologies Series).
- REHME, J. F. **Avaliação da Qualidade de Vídeo Trafegando sobre Redes IP**. Dissertação (Mestrado) — UTFPR, Janeiro 2007.
- REIMERS, U. **DVB The Family of International Standards for Digital Video Broadcasting**. Second. [S.l.]: Springer, 2005. 408 p. (Signals and Communication Technology).
- REIMERS, U. DVB The Family of International Standards for Digital Video Broadcasting. **Proceedings of the IEEE**, v. 94, n. 1, p. 173–182, January 2006.
- ROHDE&SCHWARZ. Signal-strength and Interference Measurements special 1. In: **News from Rohde&Schwarz**. Munich: Rohde&Schwarz GmbH & Co. KG, 1988. p. 86.

- ROHDE&SCHWARZ. **R&S®ETL TV Analyzer Specifications**. [S.l.], jun 2011. Data Sheet Version 11.00.
- SHIOMI, T.; HATORI, M. **Wave Summit Course: Digital Broadcasting**. [S.l.]: Ohmsha, Ltd., 2000. 288 p.
- SPIEGEL, R. M. **Estatística**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil Ltda., 1977. 580 p.
- TERMAN, F. E.; PETTIT, J. M. **Electronic Measurements**. 2. ed. Tokyo, Japan: Kogakusha Company, Ltd., 1952. 720 p. LCCCN: 51-12650.
- VASCO, C. L. **Modelo de Propagação Empírico para Sinais de TV Digital em Curitiba**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2009.
- WECK, C. DVB-T Feldversuche im Europäischen ACTS-Projekts VALIDATE (VALIDATE Field Trials of Digital Terrestrial Television (DVB-T)). **Institut für Rundfunktechnik GmbH Rundfunksystementwicklung München, Germany (Broadcasting Systems Development)**, p. 13–25, 1999.
- WU, Y. et al. Overview of Digital Television Development Worldwide. **Proceedings of the IEEE**, v. 94, n. 1, p. 8–21, January 2006.

APÊNDICE A – HISTOGRAMAS ADICIONAIS

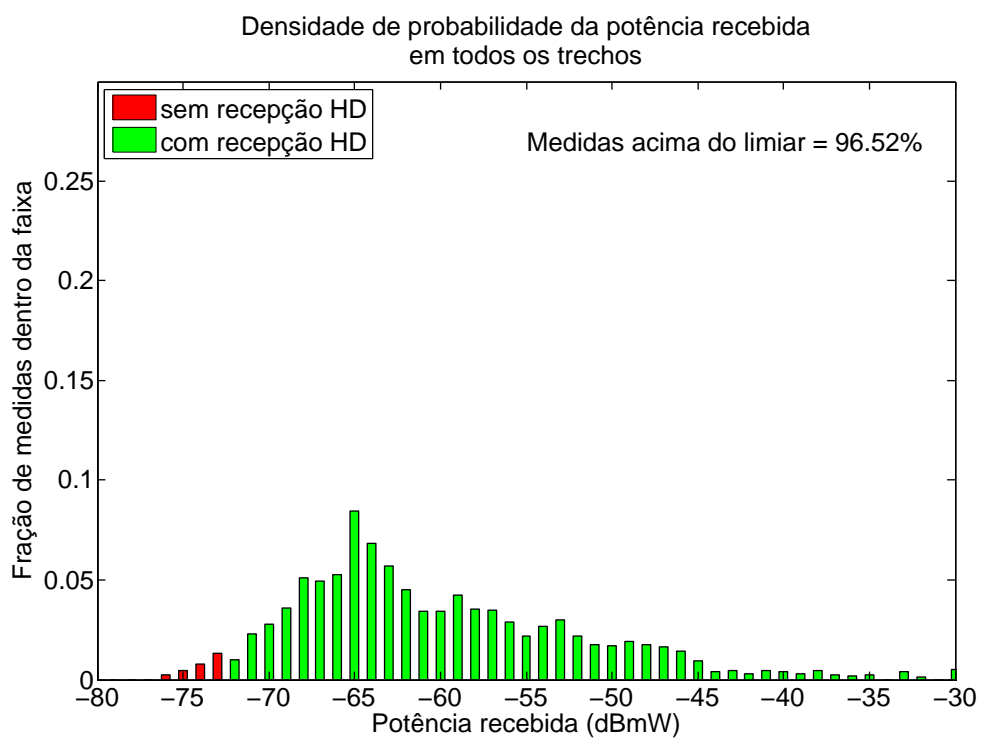


Figura 34: Fração do número total de medidas que se encontra dentro da faixa de potência especificada pela abcissa de cada barra. Barras verdes significam recepção HD; barras vermelhas assinalam falhas na recepção.

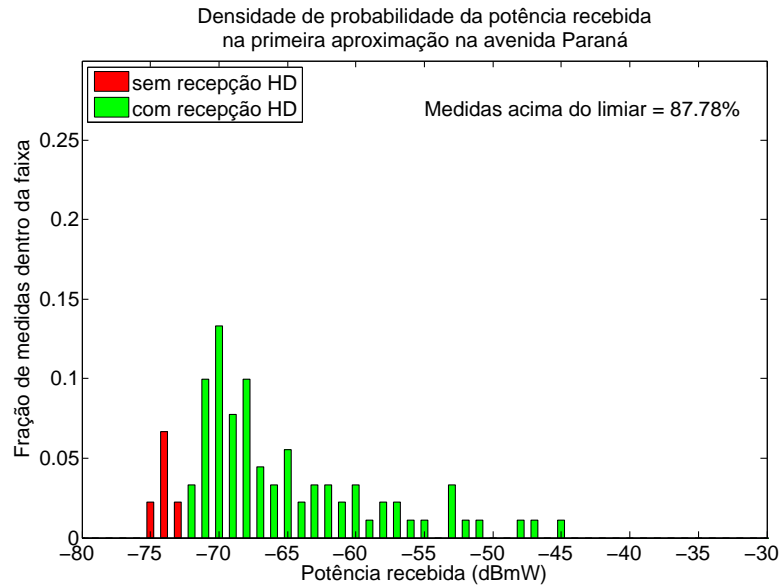


Figura 35: Fração do número total de medidas que se encontra dentro da faixa de potência especificada pela abcissa de cada barra, primeira aproximação na avenida Paraná. Barras verdes significam recepção HD; barras vermelhas assinalam falhas na recepção.

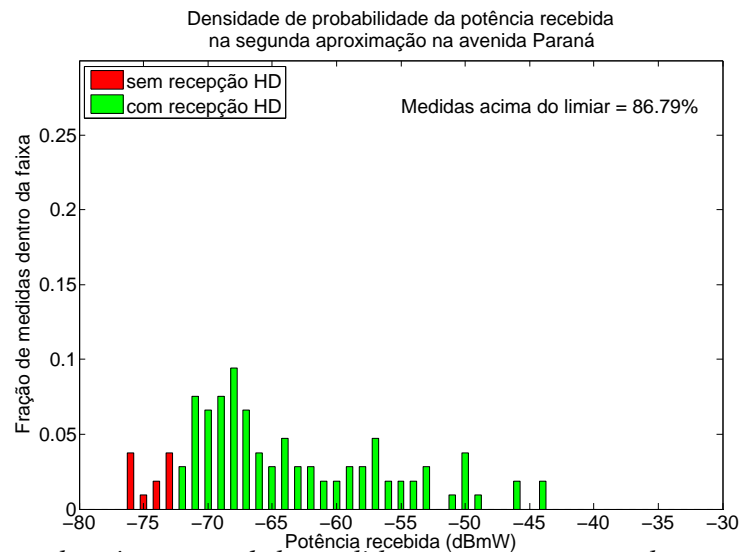


Figura 36: Fração do número total de medidas que se encontra dentro da faixa de potência especificada pela abcissa de cada barra, segunda aproximação na avenida Paraná. Barras verdes significam recepção HD; barras vermelhas assinalam falhas na recepção.

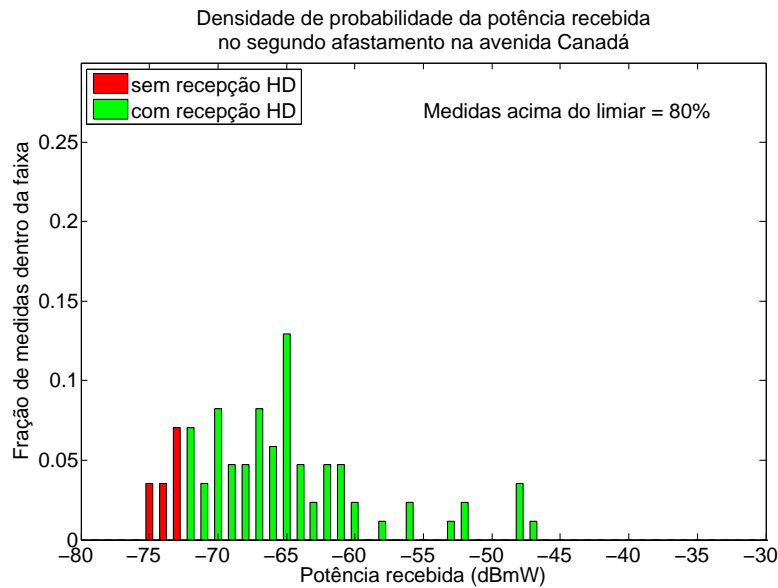


Figura 37: Fração do número total de medidas que se encontra dentro da faixa de potência especificada pela abcissa de cada barra, segundo afastamento na avenida Canadá. Barras verdes significam recepção HD; barras vermelhas assinalam falhas na recepção.

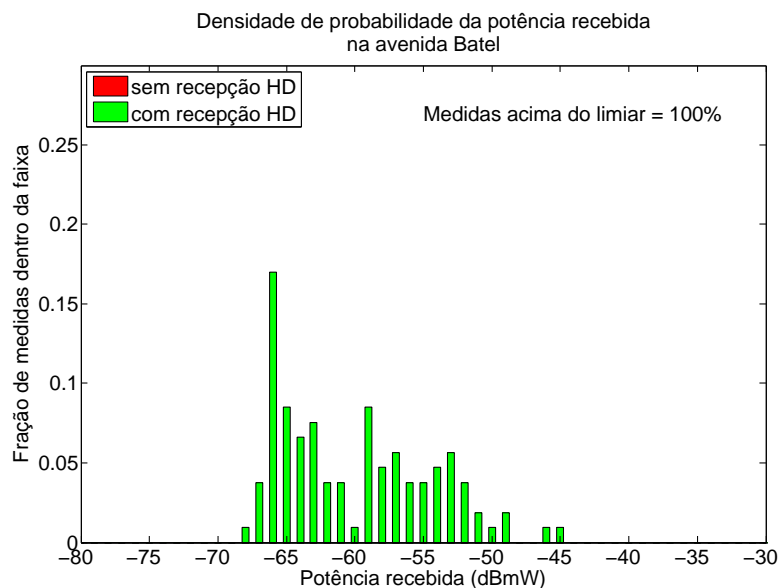


Figura 38: Fração do número total de medidas que se encontra dentro da faixa de potência especificada pela abcissa de cada barra, na avenida Batel. Barras verdes significam recepção HD; barras vermelhas assinalam falhas na recepção.