

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

CÉLIO LÚCIO VASCO

**MODELO DE PROPAGAÇÃO EMPÍRICO
PARA SINAIS DE TV DIGITAL EM CURITIBA**

DISSERTAÇÃO

CURITIBA
2009

CÉLIO LÚCIO VASCO

**MODELO DE PROPAGAÇÃO EMPÍRICO
PARA SINAIS DE TV DIGITAL EM CURITIBA**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciências, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Área de Concentração: Telemática.

Orientador: Prof. Dr. Richard Demo Souza
Co-Orientador: Prof. Dr. Alexandre de Almeida
Prado Pohl

CURITIBA
2009

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca da UTFPR – Campus Curitiba

V331m	<p>Vasco, Célio Lúcio Modelo de propagação empírico para sinais de TV digital em Curitiba / Célio Lúcio Vasco. – 2009. 64 f. : il. ; 30 cm</p> <p>Orientador: Richard Demo Souza Co-orientador: Alexandre de Almeida Prado Pohl Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. Área de Concentração: Telemática, Curitiba, 2009 Bibliografia: f. 63-4</p> <p>1. Televisão digital. 2. Comunicações digitais. 3. Processamento de sinais – Técnicas digitais. 4. Telecomunicações. I. Souza, Richard Demo, orient. II. Pohl, Alexandre de Almeida Prado, co-orient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. Área de Concentração em Telemática. IV. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDD 621.3</p>
-------	---



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

Programa de Pós-Graduação em Eng^a. Elétrica e Informática Industrial
Av. Sete de Setembro, 3165 – 80230-901 – Curitiba – PR
<http://www.cpgei.ct.utfpr.edu.pr>



“Modelo Empírico para Propagação de Sinais de TV Digital em Curitiba

por

Célio Lúcio Vasco

Esta Dissertação foi apresentada no dia 01 de julho de 2009, como requisito parcial para a obtenção do grau de MESTRE EM CIÊNCIAS – Área de Concentração: Telemática. Aprovada pela Banca Examinadora composta pelos professores:

Prof. Dr. Richard Demo Souza
(Orientador – UTFPR)

Prof. Dr. Alexandre de Almeida Prado Pohl
(Co-orientador – UTFPR)

Prof. Dr. Marcelo Eduardo Pellenz
(PUCPR)

Prof. Dr. Mário de Noronha Neto
(IFSC)

Visto e aprovado para impressão:

Prof. Dr. Humberto Remígio Gamba
Coordenador do CPGEI

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha esposa Maria Teresa pelo apoio, compreensão e carinho durante todo o transcorrer deste curso.

Ao meu orientador Prof. Richard Souza, pelo seu apoio e por seus questionamentos, que ajudaram no enriquecimento do meu estudo.

Ao meu co-orientador Prof. Alexandre Pohl, pela oportunidade de ingressar neste curso e no projeto de TV Digital da UTFPR.

À Anatel, pela liberação de horário que permitiu cursar este mestrado.

À Rede Paranaense de Comunicação pela infraestrutura disponibilizada, e aos colegas da RPC, em especial, Frederico Rehme pelas informações fornecidas.

Ao Prof. Álvaro Luiz Stelle, *in memoriam*, pela carta de apresentação ao programa do CPGEI.

“I often say that when you can measure what you are speaking about, and express it in numbers, you know something about it; but when you cannot measure it, when you cannot express it in numbers, your knowledge is of a meagre and unsatisfactory kind: it may be the beginning of knowledge, but you have scarcely, in your thoughts, advanced to the stage of science, whatever the matter may be”. (Thomson, Sir Willian - Lord Kelvin, 1889)

Costumo dizer que, quando se pode medir aquilo sobre o qual se está falando, e expressá-lo em números, sabe-se algo sobre isto; mas quando não se pode medi-lo, quando não se pode exprimi-lo em números, o seu conhecimento é de um tipo escasso e insatisfatório: pode ser o início do conhecimento, mas dificilmente terá, nas suas idéias, avançado no estágio da ciência, qualquer que seja o assunto. (Thomson, Sir Willian - Lord Kelvin, 1889)

RESUMO

VASCO, Célio Lúcio. **Modelo de propagação empírico para sinais de TV digital em Curitiba**. 2009. 64f. Dissertação (Mestrado em Telemática) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2009.

O modelamento do canal é de crucial importância na determinação da atenuação por propagação dos sinais de radiofrequência emitidos por um transmissor. Este trabalho trata da determinação de um modelo de canal a partir da análise de medidas do nível de recepção de sinais emitidos por um transmissor de TV Digital operando na faixa de UHF, em levantamento realizado na região de Curitiba. A partir da comparação de alguns modelos de propagação referenciados na literatura, foi possível ajustar o modelo log-distância para o comportamento da propagação observada no conjunto de medidas obtidos em campo, e então propor um modelo empírico de propagação que poderá ser utilizado na determinação da cobertura dos sinais de TV Digital na região de Curitiba.

Palavras-chave: Telecomunicações, Televisão Digital, Modelo de Propagação, Modelo log-distância, Curitiba.

ABSTRACT

VASCO, Célio Lúcio. **Empirical Propagation Model to Digital TV Signals in Curitiba.** 2009. 64f. Dissertação (Mestrado em Telemática) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2009.

The channel modeling is of crucial importance in determining the path loss of RF signals emitted by a transmitter. This work aimed at determining a channel model, by means of the analysis of measurement of the received signals levels from a TV Digital transmitter operating in the UHF range during a survey in the region of Curitiba. From the comparison of some propagation models reported in the literature, it was possible to fit the log-distance model for the propagation behavior observed in a set of measurements obtained in the field, and then to propose an empirical propagation model that can be used in predicting the coverage of Digital TV signals in the region of Curitiba.

Keywords: Telecommunications, Digital Television, Propagation Model, log-distance Model, Curitiba.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Geometria da reflexão no modelo de dois raios.....	16
Figura 2 – Zonas de Fresnel	18
Figura 3 – Geometria da difração em gume de faca.....	19
Figura 4 – Atenuação em função da distância para o modelo de reflexão de dois raios.....	23
Figura 5 – Curva da intensidade de campo da Rec. ITU-R P.1546.....	26
Figura 6 – Altura efetiva da antena transmissora	27
Figura 7 – Coeficiente de propagação em função da distância no modelo de Perez-Vega.....	28
Figura 8 – Diagrama em blocos do receptor utilizado para a medição	31
Figura 9 – Espectrograma de um canal de TV Digital	32
Figura 10 – Nível de recepção para o modelo de espaço livre	36
Figura 11 – Nível de recepção para as variantes do Modelo de Hata	38
Figura 12 – Nível de recepção para o modelo da ITU-R P1546	41
Figura 13 – Nível de recepção para o modelo log-distância de um segmento	43
Figura 14 – Nível de recepção para o modelo log-distância de dois segmentos	45
Figura 15 – Nível de recepção para o modelo log-distância de três segmentos.....	47
Figura 16 – Nível de recepção para o modelo log-distância misto	49
Figura 17 – Nível de recepção médio e dos modelos log-distância de um segmento e misto ..	51
Figura 18 – Nível de recepção dos modelos log-distância e de Hata	52
Figura 19 – Nível de recepção dos modelos log-distância misto e ITU-R P.1546.....	53
Figura 20 – Detalhe do nível de RX médio e dos modelos misto, ITU-R P.1546 e de Hata ...	54
Figura 21 – Aglomeração urbana na região de Curitiba.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Configurações de ensaio do transmissor	31
Tabela 2 – Resultado para o modelo de espaço livre	36
Tabela 3 – Resultado para o modelo de Hata	37
Tabela 4 – Resultado para o modelo da ITU-R P1546.....	41
Tabela 5 – Resultado para o modelo log-distância de um segmento.....	43
Tabela 6 – Resultado para o modelo log-distância de dois segmentos	44
Tabela 7 – Resultado para o modelo log-distância de três segmentos	47
Tabela 8 – Resultado para o modelo log-distância misto.....	49
Tabela 9 – Resultado para trechos da cobertura.....	56
Tabela 10 – Resultado da distância de cobertura para cada modelo	57
Tabela 11 – Resumo dos resultados obtidos.....	58
Tabela 12 – Resumo da distância de cobertura	58

LISTA DE ACRÔNIMOS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AERP	Associação das Emissoras de Radiodifusão do Paraná
Anatel	Agência Nacional de Telecomunicações
BW	<i>Bandwidth</i>
CG	Cidades Grandes
CPM	Cidades Pequenas e Médias
FCC	<i>Federal Communications Commission</i>
FEC	<i>Forward Error Correction</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
ISDB-T	<i>Integrated Services Digital Broadcasting - Terrestrial</i>
ISDB-TB	<i>Integrated Services Digital Broadcasting – Terrestrial - Brazil</i>
ITU-R	<i>International Telecommunication Union - Radiocommunication Sector</i>
LOS	<i>Line-of-Sight</i>
MER	<i>Modulation Error Ratio</i>
MMSE	<i>Minimum Mean Square Error</i>
NLOS	<i>Non-Line-of-Sight</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiplexing</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
RPC	Rede Paranaense de Comunicação
RX	Recepção
SBTVD-T	Sistema Brasileiro de Televisão Digital Terrestre
SIGAnatel	Sistema de Informações Geográficas da Anatel
TX	Transmissão
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
VHF	<i>Very High Frequency</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	MOTIVAÇÃO	12
1.2	HISTÓRICO	12
1.3	PARCERIA UTFPR/AERP/RPC	13
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	13
2	FUNDAMENTOS DE PROPAGAÇÃO.....	14
2.1	MODELO DE PROPAGAÇÃO NO ESPAÇO LIVRE	14
2.2	MECANISMOS DA PROPAGAÇÃO	15
2.2.1	Refração	15
2.2.2	Reflexão	16
2.2.3	Difração	17
2.2.4	Dispersão	19
3	MODELOS DE PROPAGAÇÃO.....	21
3.1	MODELO LOG-DISTÂNCIA.....	21
3.2	MODELO LOG-DISTÂNCIA EM DOIS SEGMENTOS	22
3.3	MODELO DE HATA	24
3.4	MODELO DA RECOMENDAÇÃO ITU-R P.1546	25
3.5	MODELO DE PÉREZ-VEGA E ZAMANILLO	28
4	ESTUDO DE CASO: PROPAGAÇÃO DA TV DIGITAL EM CURITIBA.....	29
4.1	METODOLOGIA	29
4.2	INFRAESTRUTURA DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO E RECEPÇÃO	29
4.2.1	Transmissão	30
4.2.2	Recepção.....	30
4.3	LEVANTAMENTO REALIZADO.....	31
4.4	ANÁLISE PRÉVIA DOS DADOS	33
5	DESENVOLVIMENTO.....	35
5.1	MODELO DE ESPAÇO LIVRE	35
5.2	MODELO DE HATA	37
5.3	ANÁLISE TOPOGRÁFICA.....	39
5.4	MODELO DA RECOMENDAÇÃO ITU-R P.1546	40
5.5	MODELO LOG-DISTÂNCIA.....	42
5.6	MODELO LOG-DISTÂNCIA DE DOIS SEGMENTOS	44
5.7	MODELO LOG-DISTÂNCIA DE TRÊS SEGMENTOS	46
5.8	MODELO LOG-DISTÂNCIA MISTO	48
5.9	COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS	50
5.10	ESTIMATIVA DA COBERTURA DE TRANSMISSÃO	56
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	58
6.1	RESUMO DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	58
6.2	COMPARAÇÃO DO DESVIO PADRÃO COM A LITERATURA	59
6.3	CONCLUSÕES	62
	REFERÊNCIAS	63

1 INTRODUÇÃO

A definição de um padrão para a TV digital no Brasil determinou um marco regulatório no país, e também o reaquecimento das atividades na área de radiodifusão. Com a introdução de novos padrões na codificação de áudio e vídeo, *middleware*, na modulação e transmissão dos sinais de radiofrequência, intensificaram-se os projetos de implantação destes sistemas e também as pesquisas nesta área.

Um dos desafios que essa nova tecnologia traz é o de determinar se a cobertura do novo canal com sinal digital terá o mesmo alcance que o canal da radiodifusão analógica, visto que há algumas variáveis envolvidas, tais como, nova frequência de operação e limiar de recepção definido em norma. Fatores que influenciam, diretamente, na determinação da potência do transmissor e conseqüentemente no valor do investimento a ser aplicado nos equipamentos. Portanto a modelagem do canal de radiofrequência é um fator crucial para a estimativa da propagação dos sinais de TV Digital.

1.1 MOTIVAÇÃO

A fase de testes da transmissão de um canal de TV Digital, na região metropolitana de Curitiba, capital do estado do Paraná, criou um ambiente onde as condições de propagação da região poderiam ser avaliadas. Por meio de um levantamento em campo foi possível medir a recepção do sinal de radiofrequência, e assim confrontar com a estimativa de alguns dos modelos de propagação utilizados pela comunidade científica.

Este trabalho trata da proposição de um modelo empírico que esteja de acordo com os dados do levantamento realizado na região. Este estudo é de interesse para todos os radiodifusores que pretendem implantar sistemas de TV Digital na região, assim como os pesquisadores de sistema sem fio, que buscam o melhor modelo para caracterizar o canal de radiofrequência.

1.2 HISTÓRICO

A definição do Sistema Brasileiro de Televisão Digital Terrestre - SBTVD-T foi determinada pelo Decreto nº 5.820 [1], de 29/6/2006, que instituiu o sistema japonês ISDB-T

(*Integrated Services Digital Broadcasting - Terrestrial*), com pequenas alterações, como padrão de transmissão e definiu também um prazo de dez anos para o período de transição entre o padrão analógico e o digital. O sistema brasileiro também é conhecido, internacionalmente, como ISDB-TB (*Integrated Services Digital Broadcasting - Terrestrial - Brazil*).

O início oficial das transmissões de TV Digital no Brasil [2] ocorreu no dia 2 de dezembro de 2007, quando iniciaram as transmissões na cidade de São Paulo, sendo acompanhado, desde então, por novas implantações em outras cidades do país: Rio de Janeiro e Belo Horizonte em abril de 2008 e Goiânia em agosto de 2008. Curitiba iniciou, oficialmente, as transmissões em 22 de outubro de 2008, sendo a primeira emissora de TV Digital da região sul do país. Seguiram-se, então, Porto Alegre em novembro de 2008, Campinas e Cuiabá em dezembro de 2008. No ano de 2009 foram implantadas em Aracaju em janeiro, Florianópolis e Vitória em fevereiro, Uberlândia, São José do Rio Preto, Teresina e Santos em março, Brasília em abril e Campo Grande, Fortaleza e Recife em maio.

1.3 PARCERIA UTFPR/AERP/RPC

Os ensaios realizaram-se em uma parceria entre a Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) e a Associação das Emissoras de Radiodifusão do Paraná (AERP), com auxílio da Rede Paranaense de Comunicação (RPC).

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esta dissertação está organizada em seis capítulos. No Capítulo 2 faz uma revisão da literatura sobre os fundamentos da propagação, assim como sobre os tópicos teóricos envolvidos. O Capítulo 3 descreve alguns modelos de propagação adotados na estimativa de cobertura de sinais de radiofrequência. O Capítulo 4 descreve a metodologia aplicada e a infra-estrutura utilizada no estudo de caso. No Capítulo 5 descreve a aplicação dos modelos de propagação na comparação com os dados obtidos em campo, apresentando os resultados obtidos. E, finalmente, o Capítulo 6 apresenta a discussão final dos resultados e as conclusões do trabalho.

2 FUNDAMENTOS DE PROPAGAÇÃO

Este capítulo apresenta uma revisão da literatura, contendo a descrição de alguns mecanismos de propagação que são característicos da faixa de frequências de VHF e UHF, correspondentes às faixas de 30MHz a 300MHz e 300MHz a 3GHz, respectivamente. Estas faixas de frequências são comumente utilizadas em sistemas de comunicação de média distância, até centenas de quilômetros, na condição de linha de visada (LOS) [3]. Utiliza-se do fenômeno da difração [4] que possibilita estabelecer ligações mesmo onde existam obstruções de visada, que será detalhado na seção 2.2.3. São empregadas em sistemas de telecomunicações, fixos e móveis terrestres, marítimos e aéreos, e na radiodifusão para a transmissão de sinais de televisão e de sinais sonoros [3] [4].

As ondas eletromagnéticas, destas faixas de frequência, tanto podem se propagar em uma condição de LOS, como em condições de obstrução, sem visada entre as antenas transmissora e receptora (NLOS), por exemplo, com obstrução de montanhas, florestas ou áreas urbanas com existência de edifícios. A condição de LOS será melhor detalhada no método de propagação no espaço livre, na seção 2.1, e a condição de NLOS no mecanismo de propagação por difração, na seção 2.2.3.

Serão estudados os modelos de propagação em larga escala (do inglês *large-scale*), pois caracterizam a intensidade de campo média sobre grandes distâncias de separação entre o receptor e o transmissor (de centenas de metros a quilômetros). Estes modelos são úteis para estimar a cobertura dos sinais de radiofrequência de um transmissor.

2.1 MODELO DE PROPAGAÇÃO NO ESPAÇO LIVRE

O modelo de propagação no espaço livre possibilita a predição da atenuação do sinal, em uma linha de visada entre o transmissor e o receptor. Como na maioria dos modelos de propagação em larga escala, a potência de recepção decai em uma função da distância de separação entre o transmissor e o receptor.

Utilizando a equação (3.1) do espaço livre de *Friis*, descrita em Rappaport [5], a potência de recepção P_r é dada por:

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \quad (1)$$

onde P_t é a potência do transmissor, G_t é o ganho da antena transmissora, G_r é o ganho da antena receptora, λ é o comprimento de onda do sinal transmitido, d é a distância entre o transmissor e receptor e L são outras perdas não relacionadas à propagação. Observa-se que a potência do receptor diminui com o quadrado da distância.

A atenuação por propagação (do inglês *path loss*), que representa a perda do sinal como uma quantidade positiva medida em decibel, é definida como a diferença (em dB) entre a potência transmitida e a potência recebida [5].

$$PL(dB) = P_t(dBm) - P_r(dBm) = G_t(dBi) + G_r(dBi) - L(dB) + 10 \log_{10}(\lambda^2 / (4\pi)^2 d^2) \quad (2)$$

O modelo de Friis é somente válido para distâncias que estejam no campo distante da antena transmissora [5]. O campo distante, ou região de *Fraunhofer*, de uma antena transmissora é definido como a região além da distância de campo distante d_{ff} , a qual está relacionada com a maior dimensão linear da abertura da antena transmissora e o comprimento de onda. É dada por:

$$d_{ff} = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (3)$$

onde D é a maior dimensão linear da antena. Adicionalmente, a distância d_{ff} deve satisfazer as condições de $d_{ff} \gg D$ e $d_{ff} \gg \lambda$, de modo a garantir a condição de campo distante.

2.2 MECANISMOS DA PROPAGAÇÃO

Os mecanismos que modelam a propagação das ondas eletromagnéticas são diversos, mas podem ser geralmente atribuídos à reflexão, difração e dispersão [5], sendo também incluída a refração.

2.2.1 Refração

A refração é causada pela variação do índice de refração atmosférica para diferentes altitudes [4], podendo ser afetado pelas condições do tempo. Tipicamente, o efeito da variação do índice de refração é curvar os sinais eletromagnéticos transmitidos, permitindo a recepção de sinais além do horizonte, sem a utilização de repetidores ou devido ao efeito da difração.

Os efeitos da refração são mais sentidos quanto maior a separação entre o transmissor e o receptor, não sendo relevantes para as distâncias consideradas neste trabalho.

2.2.2 Reflexão

A reflexão ocorre quando as ondas eletromagnéticas incidem sobre uma superfície que tenha grandes dimensões, comparada com o comprimento de onda, e reflete o sinal gerando um sinal secundário que poderá alcançar o receptor.

No modelo de dois raios, apresentado na Figura 1, um sinal direto de ondas eletromagnéticas viaja da antena transmissora de altura h_t para a antena receptora de altura h_r , ao longo de um caminho d' com visada direta. Um segundo sinal alcança a antena receptora ao longo do caminho d'' refletido no solo. Este modelo é utilizado comumente quando a antena transmissora está instalada a vários comprimentos de onda acima do plano horizontal do solo [6]. O sinal na antena receptora é o resultado da soma vetorial dos componentes direto e refletido.

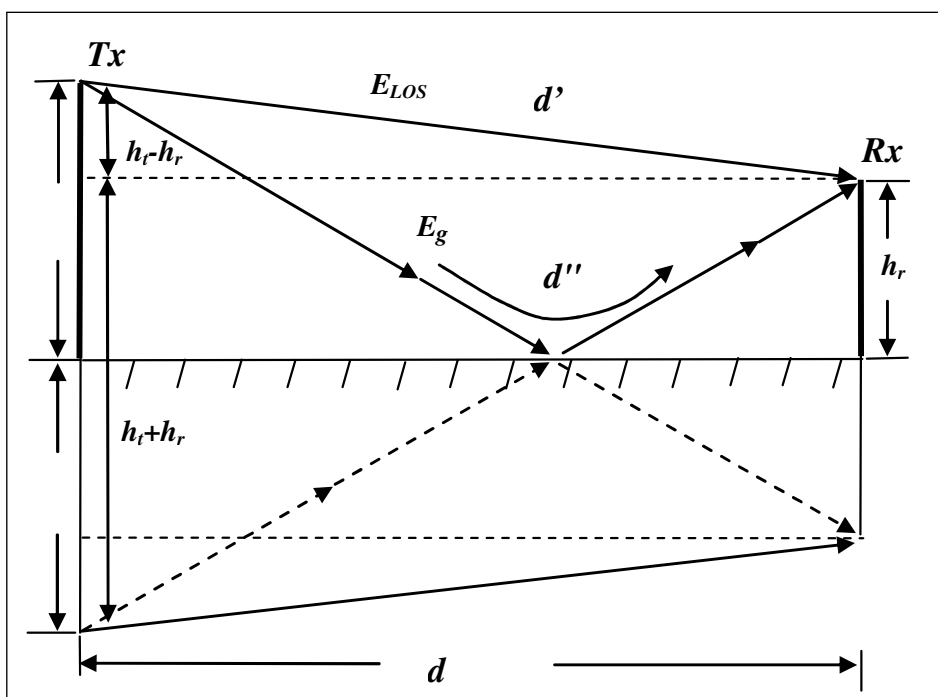


Figura 1 – Geometria da reflexão no modelo de dois raios
Fonte: Rappaport (1999)

A partir da equação (3.45) apresentada em [5], temos:

$$E_{TOT}(d) = \frac{E_0 d_0}{d'} \cos \theta_\Delta - \frac{E_0 d_0}{d''} \quad (4)$$

onde $E_{TOT}(d)$ é a intensidade do campo elétrico recebido total, correspondendo à soma vetorial da intensidade do campo elétrico recebida direta E_{LOS} e a intensidade do campo elétrico recebida refletida E_g ; d é a distância entre o transmissor e o receptor; E_0 é a intensidade de campo elétrico considerada em uma distância de referência d_0 e θ_Δ é a diferença de fase entre os sinais direto e o refletido, definido como:

$$\theta_\Delta = \frac{2\pi\Delta}{\lambda}. \quad (5)$$

A diferença das distâncias Δ pode ser calculada pela equação (3.40) apresentada em [5]:

$$\Delta = d'' - d' = \sqrt{(h_t + h_r)^2 + d^2} - \sqrt{(h_t - h_r)^2 + d^2}. \quad (6)$$

Quando (5) é avaliada para $\theta_\Delta = \pi$, ou seja, o sinal refletido chega com fase oposta ao sinal direto, a distância d é definida pela equação

$$d = \frac{4h_t h_r}{\lambda}. \quad (7)$$

Este ponto será importante para o método de dois segmentos, a ser analisado na seção 3.2.

2.2.3 Difração

A difração permite que os sinais de rádio se propaguem ao longo da superfície curvada da Terra, além do horizonte, e para trás de obstruções [5]. Apesar da atenuação que os sinais recebidos no receptor sofreram em áreas de sombras, este mecanismo ainda permite que os sinais sejam recebidos com níveis aceitáveis de potência.

A perda por difração pode ser explicada pelo conceito de zonas de Fresnel [5], que representam regiões formadas por ondas secundárias sucessivas que têm um comprimento de percurso do transmissor ao receptor, maior em $n\lambda/2$ em relação ao comprimento da linha de visada. A Figura 2 demonstra um plano transparente localizado entre o transmissor e o receptor, onde os círculos concêntricos representam as frentes de onda secundárias para um incremento do percurso de $\lambda/2$.

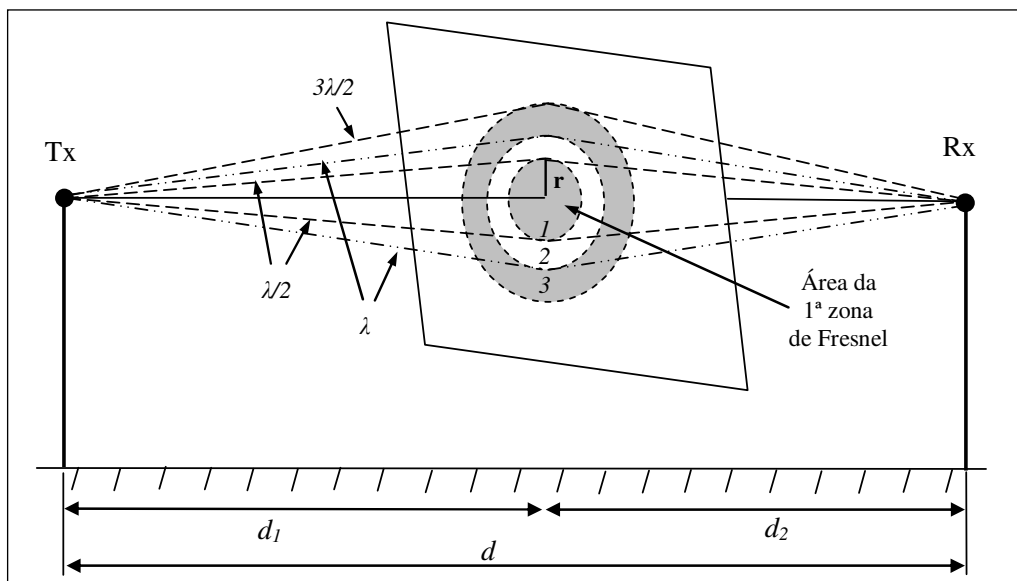


Figura 2 – Zonas de Fresnel

Fonte: Adaptado de Rappaport (1999)

As sucessivas zonas de Fresnel têm o efeito de produzirem, alternadamente, interferência construtiva e destrutiva no sinal total recebido pelo receptor. O raio do n -ésimo círculo é indicado por r_n , sendo definido, conforme [5], por:

$$r_n = \sqrt{\frac{n\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \quad (8)$$

onde n representa o número do círculo da zona de Fresnel, λ é o comprimento de onda, e d_1 e d_2 são as distâncias do ponto considerado ao transmissor e ao receptor, respectivamente. Esta equação é válida para a condição $d_1, d_2 \gg r_n$.

Dependendo da geometria da obstrução, a energia entregue ao receptor será uma soma vetorial da contribuição da energia das zonas de Fresnel desobstruídas. Geralmente, se uma obstrução não bloqueia o volume contido dentro da primeira zona de Fresnel, então a perda por difração será mínima e os efeitos da difração podem ser desprezados. O efeito de obstrução da primeira zona de Fresnel, especialmente quando a borda desta zona encosta o solo, será importante no estudo do modelo log-distância de dois segmentos, a ser descrito na seção 3.2.

Considerando que a linha de visada entre um transmissor T e um receptor R está sendo bloqueada por um obstáculo de altura h_{OBS} , conforme apresentado na Figura 3, pode-se estimar a perda por difração utilizando o parâmetro adimensional ν de difração de *Fresnel-Kirchoff*, conforme [5]:

$$v = h \sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2}} \quad (9)$$

onde h é a altura da obstrução a partir da linha de visada entre a antena transmissora e a antena receptora, d_1 é a distância entre a antena transmissora e a obstrução e d_2 é a distância entre a obstrução e a antena receptora.

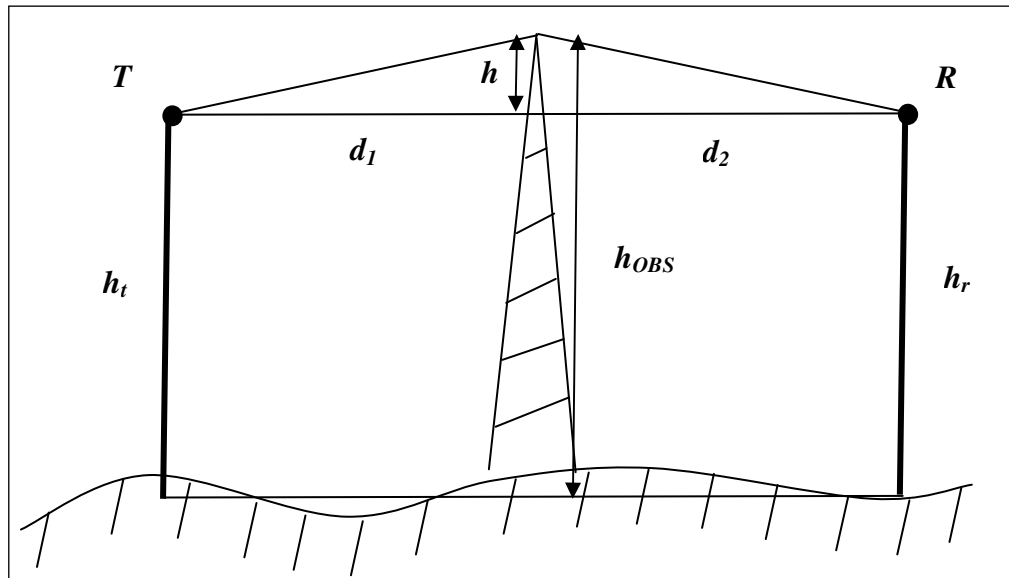


Figura 3 – Geometria da difração em gume de faca
Fonte: Rappaport (1999)

A partir do parâmetro de difração v pode ser calculada a perda por obstrução P_d , em dB, conforme [5]:

$$P_d = \begin{cases} 0 & v \leq -1 \\ -20 \log_{10}(0,5 - 0,62v) & -1 \leq v \leq 0 \\ -20 \log_{10}(0,5 \exp(-0,95v)) & 0 \leq v \leq 1 \\ -20 \log_{10}(0,4 - \sqrt{0,1184 - (0,38 - 0,1v)^2}) & 1 \leq v \leq 2,4 \\ -20 \log_{10}\left(\frac{0,225}{v}\right) & v > 2,4 \end{cases} \quad (10)$$

2.2.4 Dispersão

A dispersão, que é similar à reflexão, ocorre quando as ondas eletromagnéticas incidem sobre uma superfície que possua dimensões pequenas quando comparadas com um comprimento de onda, e onde o número de obstáculos é grande por unidade de volume,

dispersando o sinal refletido. Assim os sinais eletromagnéticos refletidos não são coerentes ou organizados, sendo espalhados em todas as direções. Objetos como postes de iluminação e árvores podem dispersar os sinais em todas as direções, assim provendo uma energia adicional no receptor [5]. A modelagem deste mecanismo de propagação é mais complexo que a reflexão.

Os fundamentos dos mecanismos de propagação, estudados neste capítulo, são aplicados nos modelos de propagação que são amplamente utilizados na prática para a estimativa da atenuação de propagação dos sistemas sem fio. Alguns destes modelos serão descritos no próximo capítulo.

3 MODELOS DE PROPAGAÇÃO

Este capítulo apresenta a descrição de alguns modelos de propagação, que possam ser utilizados para a faixa de VHF e UHF, para a estimativa da atenuação por propagação.

Os modelos de propagação, quanto à modelagem, podem ser divididos em três tipos: empíricos, teóricos e específicos do local [7]. Os modelos empíricos são, normalmente, um conjunto de equações ajustadas obtidos por meio de extensivas medidas em campo. São simples e eficientes, mas a exatidão de sua aplicação depende da similaridade com os ambientes onde as medições foram feitas. Os modelos específicos do local (do inglês *site-specific*) são baseados em métodos numéricos aplicados à geometria dos locais estudados, sendo mais detalhados e exatos, mas necessitando uma grande capacidade computacional, especialmente em ambientes complexos. Os modelos teóricos são derivados dos fenômenos físicos assumindo algumas condições ideais, incluídos aqui, os modelos estatísticos utilizados para a estimativa de propagação em pequena escala (do inglês *small-scale*).

Os modelos de propagação, quanto à aplicação, podem ser divididos em duas categorias [4]: ponto-área (ou local geral) e ponto-a-ponto (ou local específico). Os modelos ponto-área provêm uma estimativa geral da propagação baseada em características nominais dos dados da propagação, que se presume existir no ambiente analisado, portanto é mais genérico e menos preciso. Os modelos ponto-a-ponto não são apenas a estimativa de rádio enlaces, mas possibilitam descrever explicitamente o comportamento da propagação ao longo de um caminho em particular entre o transmissor e o receptor. Pela repetição das análises de diversos caminhos ou azimutes, é possível determinar o comportamento da região analisada. Neste caso é necessário conhecer a topografia e características do terreno ao longo do caminho.

3.1 MODELO LOG-DISTÂNCIA

O modelo de propagação log-distância descreve que o comportamento do nível do sinal de radiofrequência recebido decresce logaritmicamente com a distância [5]. Assim, a atenuação por propagação PL na distância d , que é a distância do transmissor ao ponto medido, é definida conforme [5]:

$$PL(d) = PL(d_0) + 10n \log_{10}(d / d_0) \quad (11)$$

onde $PL(d_0)$ é a atenuação por propagação na distância d_0 , que é uma distância de referência próxima ao transmissor e n o expoente da atenuação por propagação. A atenuação $PL(d_0)$ é normalmente calculada utilizando o método de propagação no espaço livre pois encontra-se muito próximo da antena transmissora.

Este modelo de normalização logarítmica onde a atenuação por propagação é caracterizada por um fator de atenuação, que no caso, é o expoente de propagação n , é um modelo não dependente da frequência, podendo ser utilizado em várias faixas de transmissão, e o valor de n contém intrinsecamente o efeito de todos os mecanismos de propagação [8]. A dificuldade deste modelo é na determinação do valor de n .

3.2 MODELO LOG-DISTÂNCIA EM DOIS SEGMENTOS

O modelo log-distância em dois segmentos (do inglês *dual slope*), ou modelo de regressão dupla [6], é uma variante do modelo log-distância que considera duas regiões de comportamento de propagação, separadas por um ponto de joelho, que é fixado pela distância de obstrução da primeira zona de Fresnel d_f . A atenuação por propagação PL_1 a uma distância d de separação entre o transmissor e receptor é dada por:

$$PL_1(d) = \begin{cases} (10n_1) \log_{10}(d) + p_1, & 1 < d < d_f \\ (10n_2) \log_{10}(d/d_f) \\ \quad + (10n_1) \log_{10}(d_f) \\ \quad + p_1, & d > d_f \end{cases} \quad (12)$$

onde $p_1 = PL(d_0)$ é a atenuação em dB no ponto de referência d_0 . Os parâmetros desconhecidos n_1 e n_2 são os expoentes da atenuação por propagação das duas regiões do modelo.

O gráfico da Figura 4, conforme [6], que representa a atenuação do espaço livre em relação à distância de separação do transmissor ao receptor quando analisado conforme o modelo de dois raios (seção 2.2.2), apresenta a existência de duas inclinações de reta indicando que existem dois comportamentos diferentes da propagação ao longo do percurso. O ponto de intersecção das duas retas representa o ponto de *break point* [6], denominado neste trabalho como ponto de joelho. Este fenômeno se deve ao ponto em que a primeira zona de Fresnel fica obstruída, por atingir o solo, aumentando a atenuação do espaço livre [6].

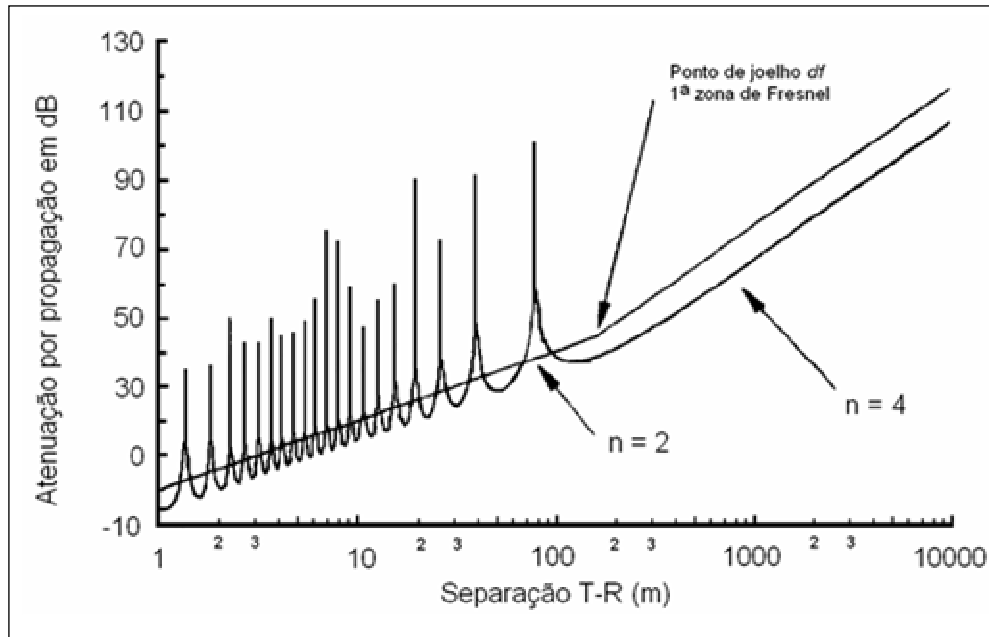


Figura 4 – Atenuação em função da distância para o modelo de reflexão de dois raios
Fonte: Traduzido de Feuerstein (1994)

Segundo [6], a distância da obstrução da primeira zona de Fresnel d_f , é dada por:

$$d_f = \frac{1}{\lambda} \sqrt{(\Sigma^2 - \Delta^2)^2 - 2(\Sigma^2 + \Delta^2)\left(\frac{\lambda}{2}\right)^2 + \left(\frac{\lambda}{2}\right)^4} \quad (13)$$

sendo $\Sigma = h_t + h_r$ e $\Delta = h_t - h_r$, onde h_t é a altura da antena transmissora e h_r é a altura da antena receptora.

A condição definida pela equação (7) no modelo de dois raios, acontece em uma distância d de separação entre o transmissor e o receptor, onde a primeira zona de Fresnel atinge o nível do solo. Entretanto há uma outra definição do ponto de joelho d_{f1} dada por:

$$d_{f1} = \frac{4h_t h_r}{\lambda} \quad (14)$$

A aplicação de (13) e (14) apresentam os mesmos resultados, porque são obtidos por meio do modelo de reflexão de dois raios. O modelo de zonas de Fresnel é válido somente para casos de LOS, onde há, ou é considerado que existe, um caminho direto e um refletido sobre um terreno plano [6].

Por sua vez, Ito *et al* em [9], observando que há diferenças entre os pesquisadores na determinação desse ponto, na condição de LOS, propôs que a distância do ponto de joelho d_{f2} , de um modelo de regressão dupla, é definida por:

$$d_{f2} = k_b \frac{h_t h_r}{\lambda} \quad (15)$$

onde k_b é o coeficiente de *breakpoint*. Em seu artigo, foi analisado o erro médio quadrático para diferentes valores de k_b , e considerado o valor que obteve o menor erro para as medidas realizadas, quando aplicado um método de regressão dupla. Assim interpreta-se que esta distância de joelho obtida empiricamente representa a influência do ambiente em relação ao modelo ideal.

3.3 MODELO DE HATA

O modelo de Hata [10] trata de uma formulação matemática para a base gráfica empírica das atenuações por propagação providas por Okumura [11], sendo válido para a faixa de 150MHz a 1500MHz. A equação que define a atenuação para áreas urbanas é dada por [5]:

$$L_{50}(\text{urbana}) = 69,55 + 26,16 \log_{10} f_c - 13,82 \log_{10} h_{te} - a(h_{re}) + (44,9 - 6,55 \log_{10} h_{te}) \log_{10} d \quad (16)$$

onde L_{50} é a atenuação por propagação (em dB), para uma condição de atender uma média de 50% das localidades urbanas; f_c é a frequência de operação (em MHz); h_{te} é a altura da antena transmissora (em metros), h_{re} é a altura da antena receptora (em metros) e d é a distância do transmissor ao receptor (em quilômetros). O fator de correção $a(h_{re})$ para uma cidade grande e para frequência maior que 300MHz, é dado por:

$$a(h_{re}) = 3,2(\log_{10} 11,75 h_{re})^2 - 4,97, \quad (17)$$

enquanto o fator de correção $a(h_{re})$ para uma cidade média ou pequena é dado por:

$$a(h_{re}) = (1,1 \log_{10} f_c - 0,7) h_{re} - (1,56 \log_{10} f_c - 0,8). \quad (18)$$

Para as áreas suburbanas, a equação básica de áreas urbanas (16) é modificada para:

$$L_{50}(\text{suburbana}) = L_{50}(\text{urbana}) - 2[\log_{10}(f_c / 28)]^2 - 5,4. \quad (19)$$

Este modelo tem uma grande aplicabilidade, porque a fórmula básica possui várias adaptações da equação para a aplicação em diversas situações, como por exemplo, em grandes cidades, pequenas e médias cidades, áreas urbanas, suburbanas e rurais.

3.4 MODELO DA RECOMENDAÇÃO ITU-R P.1546

Este modelo de propagação é definido pela recomendação ITU-R P.1546 [12] e descreve o método de estimativa de propagação ponto-área para os serviços terrestres na faixa de frequências de 30MHz a 3000MHz. A atenuação por propagação é encontrada por meio de curvas, obtidas empiricamente, contendo diversas variáveis, como, por exemplo, altura da antena transmissora, distância de separação entre o transmissor e o receptor, condições do terreno e variabilidade temporal da estimativa. A Figura 5 apresenta a curva da intensidade de campo em função da distância para a frequência de 600MHz, em percurso terrestre e para a condição da intensidade de campo excedida em 50% das localidades para 50% do tempo.

O método da recomendação ITU-R P.1546, na versão 1, é utilizado como base de estimativa de propagação para projetos de radiodifusão, conforme definido pelo Anexo II da resolução da Anatel nº 398 [13]. Este modelo permite a determinação da intensidade de campo E , em $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ para 1kWerp^1 , em função da distância. Entretanto para calcular a atenuação de propagação L_b , em dB, utiliza-se a equação (37) do Anexo 5 da ITU-R P.1546-3 [12] definida por:

$$L_b = 139,3 + 20 \log_{10}(f) - E \quad (20)$$

onde f é a frequência de operação dada em MHz.

Como este modelo é compatível com o método de Hata, o Anexo 7 da recomendação ITU-R P.1546-1 [13], apresenta a equação para obtenção da intensidade de campo dada por:

$$E = 69,82 - 6,16 \log_{10} f + 13,82 \log_{10} H_1 + a(H_2) - (44,9 - 6,55 \log_{10} H_1)(\log_{10} d)^b \quad (21)$$

onde E é a intensidade de campo em $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ para 1kWerp ; f é a frequência de operação (em MHz); H_1 é a altura da antena transmissora (em metros); H_2 é a altura da antena receptora (em metros); d é a distância do transmissor ao receptor (em km) e b é um fator de correção dependente de H_1 e de d , sendo que $b=1$ para $d \leq 20\text{km}$. O fator de correção para a antena receptora é dado por:

$$a(H_2) = (1,1 \log_{10} f - 0,7)H_2 - (1,56 \log_{10} f - 0,8) \quad (22)$$

¹ Potência efetiva irradiada (ERP) de 1kW em relação à uma antena dipolo de meia onda.

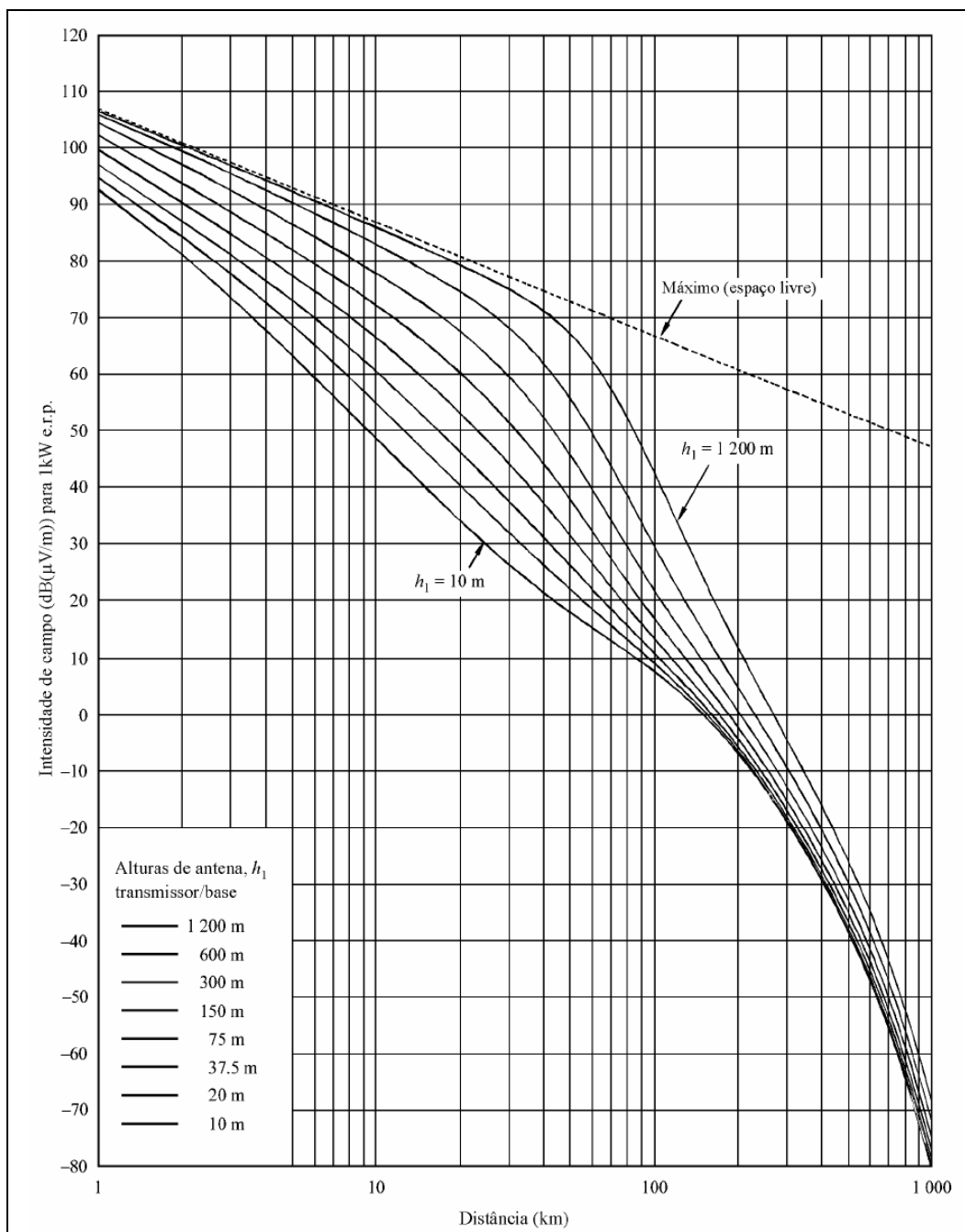


Figura 5 – Curva da intensidade de campo da Rec. ITU-R P.1546.

Fonte: Rec. ITU-R P.1546-1, anexo à Resolução Anatel nº 398 (2005)

Conforme [13], o método da recomendação ITU-R P.1546 produz resultados similares ao método Okumura-Hata para distâncias até 10km. Aplicando-se (21) em (20) encontra-se a equação da atenuação de propagação do modelo de Hata para áreas urbanas (16), e como a equação (22) do fator de correção apresentado na recomendação ITU-R P.1546-1, é a mesma que a equação (18), pode-se inferir que o modelo comparado pela recomendação ITU-R P.1546-1 é equivalente ao modelo de Hata para pequenas e médias cidades.

O modelo da recomendação ITU-R P1546 está baseado na altura da antena transmissora. Aqui se aplica o conceito da altura efetiva [13], que é definida como a altura da antena, em metros, acima do nível médio do terreno, como representado por h_{eff} na Figura 6. Quando a distância d entre o transmissor e o receptor for maior ou igual a 15km, a altura média é calculada entre as distâncias de 3 a 15km a partir da antena transmissora, em direção à antena receptora. Quando a distância d for menor que 15km, e forem conhecidas as informações do terreno, a altura média do terreno é calculada entre o trecho de $0,2d$ até d .

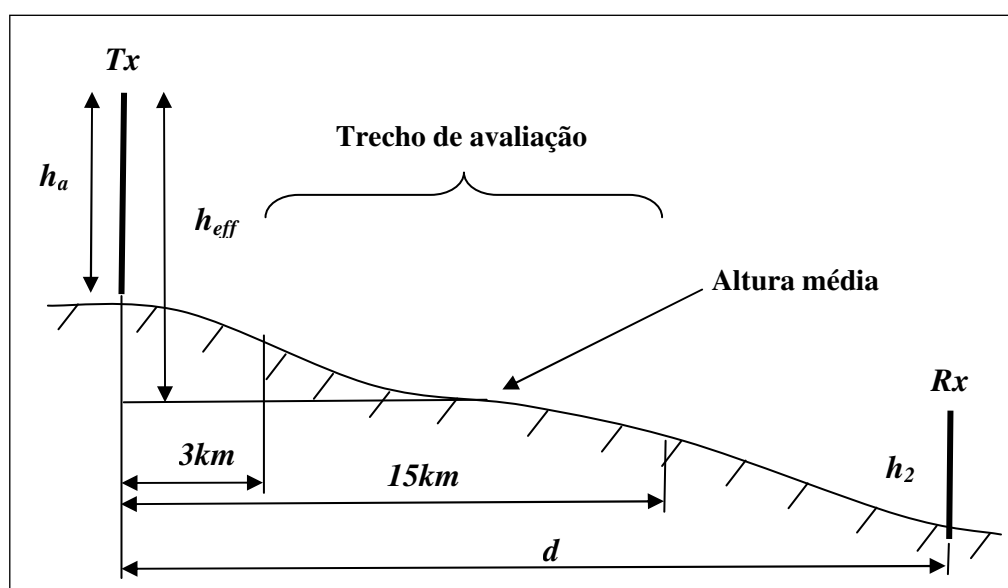


Figura 6 – Altura efetiva da antena transmissora

Fonte: Autoria própria

O Anexo 7 da recomendação ITU-R P.1546-1 [13] apresenta diversos fatores de correção que podem ser aplicados na estimativa da propagação, sendo por exemplo, a correção para a altura da antena receptora/móvel, conforme a seção 9 de [13], e a correção para percursos curtos urbanos/suburbanos, conforme a seção 10 de [13]. A primeira trata da correção da altura da antena receptora quando esta for diferente da altura de 10m, dependendo, também, da altura efetiva da antena transmissora, distância entre o transmissor e receptor e a altura da cobertura do solo ao redor da antena receptora. A segunda trata da correção da obstrução de prédios na propagação, para percursos menores que 15km, dependente da frequência de operação, distância entre o transmissor e o receptor, da altura do solo da antena transmissora e da altura da cobertura do solo ao redor da antena receptora.

3.5 MODELO DE PÉREZ-VEGA E ZAMANILLO

O modelo de Pérez-Vega e Zamanillo [8] caracteriza-se pela avaliação do coeficiente de propagação n em função da distância de separação entre o transmissor e o receptor d e a altura da antena transmissora h . Por meio de um algoritmo computacional, baseado nos dados contidos nas curvas de estimativa de propagação F(50,50), que é a condição da intensidade de campo excedida em 50% das localidades para 50% do tempo, do órgão americano FCC [14], foi desenvolvido um modelo polinomial de quarto grau que permite estimar a propagação, dado por:

$$n = \sum_{i=0}^4 \sum_{j=0}^4 a_{ij} h^i d^j \quad (23)$$

onde a_{ij} são os coeficientes das parcelas do polinômio, definidos pelo método.

Como apresentado na Figura 7, conforme [8], observa-se que o coeficiente de propagação n varia em função da distância de separação entre o transmissor e o receptor e em função da altura da antena transmissora. Deste modo, a estimativa da atenuação por propagação, utilizando o método log-distância, depende do coeficiente de propagação n de cada ponto, diferentemente de outros métodos que trabalham com um coeficiente de propagação médio válido para toda a região.

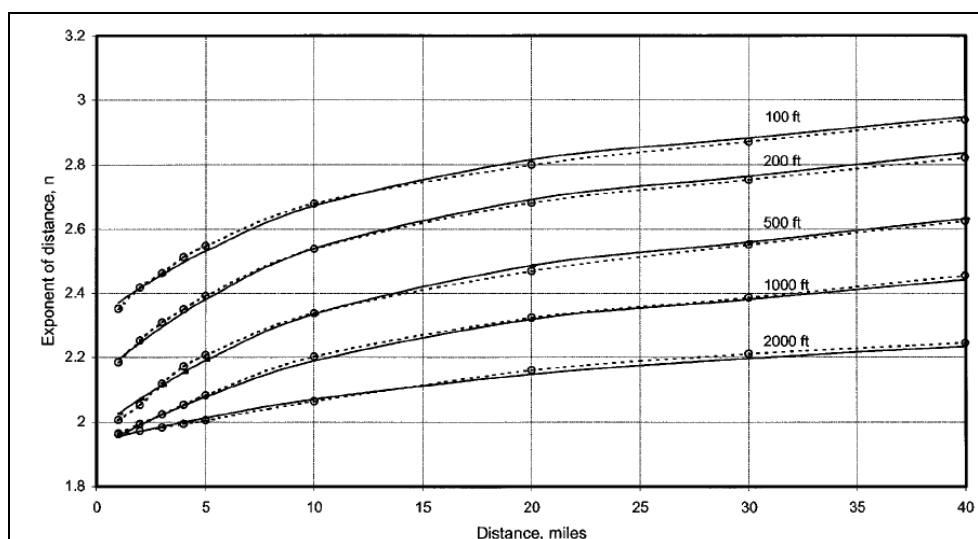


Figura 7 – Coeficiente de propagação em função da distância no modelo de Perez-Vega
Fonte: Pérez-Vega (2002)

Após a descrição de alguns dos métodos de propagação existentes, no próximo capítulo será apresentada a aplicação destes métodos em um estudo de caso de cobertura de sinais de radiodifusão.

4 ESTUDO DE CASO: PROPAGAÇÃO DA TV DIGITAL EM CURITIBA

Este capítulo descreve um estudo de caso de cobertura de sinais de radiodifusão na cidade de Curitiba.

O início dos ensaios da transmissão de TV Digital em Curitiba deu-se a partir da autorização para a UTFPR executar o Serviço Especial para Fins Científicos ou Experimentais conforme o Ato nº 1388 [15], de 12/3/2008, emitido pela Agência Nacional de Telecomunicações – Anatel.

A base de dados considerada compõe-se das medidas coletadas em 223 pontos avaliados desde 13 de junho de 2008 até a data de 25 de setembro de 2008, distribuídos pelo município de Curitiba e Região Metropolitana.

4.1 METODOLOGIA

A metodologia aplicada foi realizar um levantamento em campo de medições do nível de recepção dos sinais de radiofrequência em diferentes pontos da região de Curitiba. Os valores medidos pela pessoa designada para a coleta de dados foram registrados em fichas de campo, que posteriormente foram transcritas para um sistema informacional.

A quantidade de pontos foi determinada em função do prazo para a realização dos testes, estimado em três meses, considerando o tempo de realização de cada seqüência de medidas. A localização de 180 pontos foram distribuídas, não uniformemente, entre as distâncias de 0,21km até 57,7km, em diferentes azimutes e em locais com diversas situações de terreno, de aglomeração urbana e de obstruções, com a possibilidade de acesso por automóvel, de modo a cobrir a maior área possível da região. Também, foram escolhidos mais 43 pontos considerados como críticos, para ter amostras do nível de recepção em locais que se têm a presunção que havia grande atenuação do sinal, devido às condições topográficas e de obstrução.

4.2 INFRAESTRUTURA DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO E RECEPÇÃO

A viabilização do estudo foi possibilitada pela Rede Paranaense de Comunicação (RPC), um dos radiodifusores da capital paranaense associado à AERP, que cedeu a infra-

estrutura necessária, ou seja, o sistema de transmissão operando no canal 41 de UHF e a unidade móvel com os equipamentos de recepção e de medição.

4.2.1 Transmissão

As características do sistema de transmissão estão descritas no Ato nº 1.388 da Anatel [15], sendo:

- a) O equipamento transmissor utilizado é do fabricante “Linear Equipamentos Eletrônicos S.A.”, modelo IS74K1 com potência de operação de até 4,1 kW sintonizado no canal 41, ocupando a faixa de frequências entre 632 a 638 MHz. A frequência da portadora foi ajustada em 635,142857 MHz, ou seja, a frequência central deslocada de 1/7MHz conforme a norma ABNT NBR 15601 [16];
- b) O sistema irradiante utilizado é do fabricante “Transtel Conti & Cia Ltda.”, modelo TTSL8 U0 - 41-10D, Omnidirecional, com 8 fendas, apresentando um ganho total de 10,89 dBd;
- c) O centro geométrico do sistema irradiante está instalado a 90,0m acima da cota da base, localizada a 950m acima do nível do mar. O azimute de orientação é de 0° NV.

4.2.2 Recepção

A coleta dos dados de recepção foi realizada em um veículo denominado de Unidade Móvel de Medição de Campo, da RPC, equipado com:

- a) Um mastro telescópico de 8m, instalado com uma antena log-periódica do fabricante “Proeletronic” com 8 elementos, para toda a banda de canais UHF;
- b) Um analisador de espectro do fabricante Agilent modelo ESA E4405B para a medição dos níveis da recepção conectado a um *notebook* para coleta de dados;
- c) Um receptor de TV Digital conectado a um monitor na razão de aspecto de 16:9. Isto permite a pontuação subjetiva da qualidade do sinal recebido;
- e) Um receptor de GPS para medir as coordenadas do ponto.

A altura de 8m foi utilizada para simular uma antena de recepção instalada no telhado de uma residência.

A Figura 8 apresenta o diagrama em blocos do *setup* do receptor utilizado para a medição do sinal nos pontos de teste.

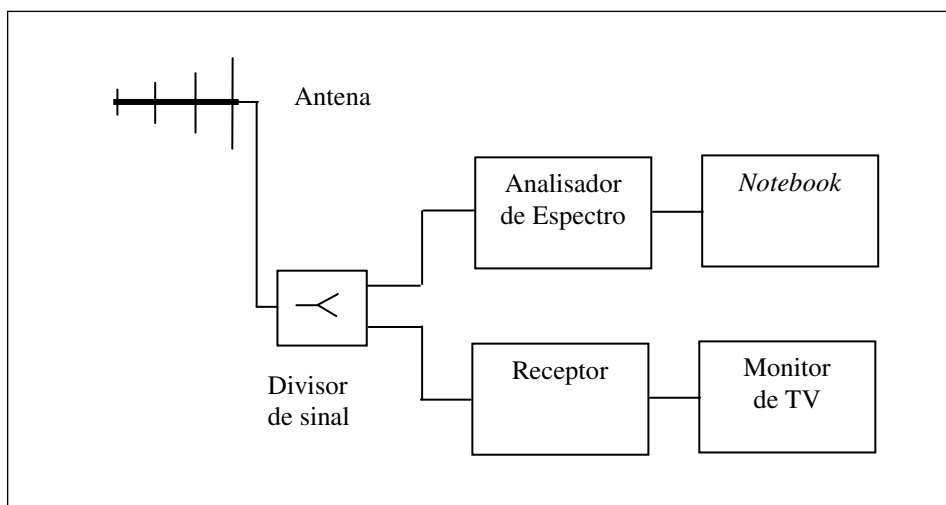


Figura 8 – Diagrama em blocos do receptor utilizado para a medição
Fonte: Autoria própria

4.3 LEVANTAMENTO REALIZADO

A coleta de dados foi realizada em seis configurações de transmissão, apresentadas na Tabela 1, de modo a verificar o comportamento da transmissão do sinal digital para os diversos ajustes do transmissor.

Tabela 1 - Configurações de ensaio do transmissor

Configuração	Modulação	Intervalo de guarda	FEC (LD/HD)	Potência de transmissão
1	LD=QPSK,HD= 64QAM	1/16	3/4, 3/4	4,1 kW
2	LD=QPSK,HD= 64QAM	1/8	3/4, 3/4	4,1 kW
3	LD=QPSK,HD= 64QAM	1/32	3/4, 3/4	4,1 kW
4	LD=QPSK,HD= 64QAM	1/8	1/2, 7/8	4,1 kW
5	LD=QPSK,HD= 64QAM	1/32	2/3, 3/4	1,0 kW
6	LD=QPSK,HD= 64QAM	1/16	2/3, 3/4	1,0 kW

Fonte: RPC

Somente nas configurações 1 e 6 que foram medidas, no analisador de espectro, a potência de canal para 6MHz, a potência média e a relação sinal/ruído, que são relevantes para a análise de propagação dos sinais. As outras configurações foram utilizadas para as medidas de MER e ajustes do transmissor, que não fazem parte da análise deste trabalho.

Essas duas potências medidas representam a potência média RMS, em dBm, onde o medidor, interno ao analisador de espectro, determina o valor médio dos níveis RMS, por meio do cálculo da raiz quadrada da soma dos quadrados das tensões coletadas nas diversas

medidas durante um intervalo de tempo, dividido pela impedância característica de entrada, normalmente de 50 ohms [18].

A potência de canal é a medida da potência média RMS em uma banda passante do sinal de interesse [17], que, no caso, é o canal de radiofrequência de 6MHz, como mostrado pela Figura 9. Corresponde ao valor da integração da potência de todas as portadoras constituintes do sinal OFDM utilizadas na transmissão dos sinais da TV Digital no padrão ISDB-T. A medida é feita no analisador de espectro uma única vez e com a largura de banda ajustada pelo operador, correspondendo à potência que o receptor estaria recebendo em toda a banda passante do canal.

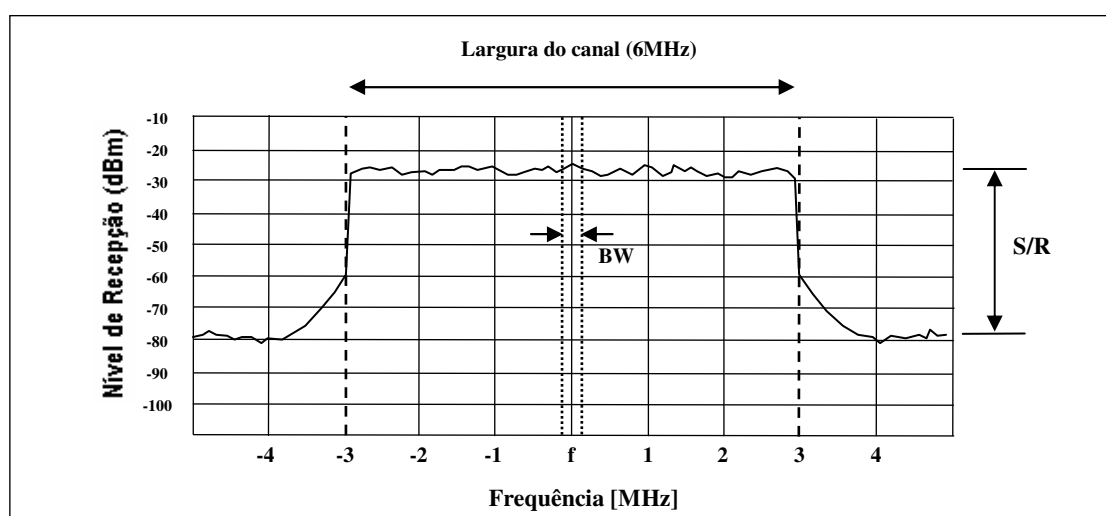


Figura 9 – Espectrograma de um canal de TV Digital

Fonte: Autoria própria

A potência média é obtida pela média das diversas medições sequenciais da potência RMS recebida para uma banda passante (BW) selecionada, por meio de filtros preexistentes, no medidor do analisador de espectro. A Figura 9 apresenta a BW centralizada no canal, indicando a medição seletiva do sinal. A medida foi feita no analisador de espectro, sequencialmente, com 100 medidas consecutivas, utilizando um filtro padrão com BW de 30kHz, e corresponde, aproximadamente, à potência média recebida na frequência da portadora, das últimas 100 amostras coletadas.

A relação sinal/ruído (S/R) foi medida como a diferença entre o nível médio da potência do sinal recebido, próxima à portadora, e o nível médio do patamar de ruído, como mostrado na Figura 9. A medida foi feita pelo operador, diretamente na tela do analisador de espectro.

A medida utilizada para a estimativa da propagação foi somente a potência de canal para 6MHz, coletada na configuração 1, que representa efetivamente a potência recebida por um receptor dos sinais da TV Digital. As medidas da potência média e da relação sinal/ruído da configuração 1 e as medidas de potência de canal, potência média e da relação sinal/ruído da configuração 6 foram utilizadas somente para a análise da consistência dos dados coletados, como descrito na seção 4.4.

4.4 ANÁLISE PRÉVIA DOS DADOS

Antes da análise dos dados coletados, para estimativa da propagação, foi realizada uma análise prévia dos dados para:

- a) Eliminar os valores com inconsistência de medição; e
- b) Eliminar os valores com desvio padrão muito alto.

A verificação da consistência de medição permite eliminar os dados que possam conter erros pontuais de medição, registro ou transcrição, que poderiam levar a conclusões erradas na etapa de análise dos dados. Nesta etapa foi realizada a comparação da:

- a) Potência de canal medida nas condições da potência do transmissor de 4,1kW e 1kW, onde a diferença estatística encontrada foi de 6,7dB² sendo aceita uma tolerância de ± 4 dB;
- b) Potência de canal e potência média medidas nas condições da potência do transmissor de 4,1kW, onde a diferença estatística encontrada foi de 22,3dB³ sendo aceita uma tolerância de ± 5 dB; e
- c) A relação sinal ruído ser maior que 3dB.

A verificação dos pontos que estão com diferença além de ± 20 dB entre o valor medido e o estimado pelo modelo log-distância, que corresponde ao dobro de um desvio padrão médio de 10dB, visa eliminar pontos que possam ser considerados anômalos da média dos valores. Estes pontos podem estar atrás de obstáculos próximos do receptor, estar sofrendo a influência de sinais refletidos que podem alterar a potência recebida muito acima

² Utilizou-se o valor de 6,7dB correspondente à média estatística da diferença das medidas realizadas, ao invés de 6,1dB resultante da diferença calculada entre 4,1kW e 1kW. Possivelmente esta diferença se deve ao ajuste manual da potência do transmissor ou variação de propagação entre as duas medidas.

³ Utilizou-se o valor de 22,3dB correspondente à média estatística da diferença das medidas realizadas, ao invés de 23,0dB, resultante da diferença calculada da banda passante de 6MHz para 30kHz utilizada no analisador de espectro.

como muito abaixo da média, ou até a anotação incorreta da medida pela pessoa responsável pela coleta dos dados.

Portanto, após a pré-seleção dos 223 pontos coletados restaram 174 pontos considerados válidos, medidos de 0,21 km a 57,7km, que foram utilizados para a realização deste trabalho, cujo desenvolvimento está descrito no próximo capítulo.

5 DESENVOLVIMENTO

No desenvolvimento deste trabalho, além da estimativa de atenuação em espaço livre, foram utilizados os modelos de Hata, da recomendação ITU-R P1546, log-distância e variações do modelo de log-distância com regressões múltiplas.

As análises realizadas neste capítulo basearam-se na comparação da potência recebida, medida nos pontos, em relação ao calculado para cada modelo considerado, sempre em função da distância de separação entre o transmissor e o receptor. Para comparação numérica, foi calculado o erro médio e_m dado por:

$$e_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p_{mi} - p_{ei}) \quad (24)$$

onde N é o número de pontos, p_{mi} é a potência medida no ponto i e p_{ei} é a potência estimada no ponto i ; e o desvio padrão σ dado por:

$$\sigma = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p_{mi} - p_{ei})^2 \right)^{1/2}. \quad (25)$$

5.1 MODELO DE ESPAÇO LIVRE

Como primeiro modelo de estimativa da atenuação por propagação foi utilizado o modelo de espaço livre, conforme descrito na seção 2.1.

A potência recebida P_r para o modelo de espaço livre, conforme (2), é dada por:

$$P_r (dBm) = P_t (dBm) + G_t (dB) + G_r (dB) - L (dB) - 10 \log_{10} (\lambda^2 / (4\pi)^2 d^2). \quad (26)$$

A potência do transmissor P_t utilizada foi de 4,1kW, ou seja, 66,13dBm. O ganho da antena transmissora G_t igual a 10,89dBd, conforme descrito em 4.2.1. O ganho da antena receptora G_r foi considerado igual a 0dB pois o pequeno ganho da antena foi diminuído pelas perdas dos divisores, conforme pode ser visto no diagrama em blocos apresentado na seção 4.2.2. As outras perdas não relacionadas à propagação L igual a 1,48dB, correspondente à perda na linha de transmissão de 100m utilizada entre a saída do transmissor e a antena [15]. Portanto a potência efetiva irradiada é de 75,54dBm, que equivale a 35,81kW irradiados. A frequência de transmissão foi de 635,142857MHz, correspondendo a um comprimento de onda $\lambda=0,47$ m. Estes valores foram utilizados na avaliação de todos os métodos estudados.

O gráfico da Figura 10 apresenta a potência de recepção em função da distância de separação entre o transmissor e o receptor para a estimativa do método de espaço livre. Também estão indicados os valores das potências de recepção medidas nos pontos do levantamento realizado em campo.

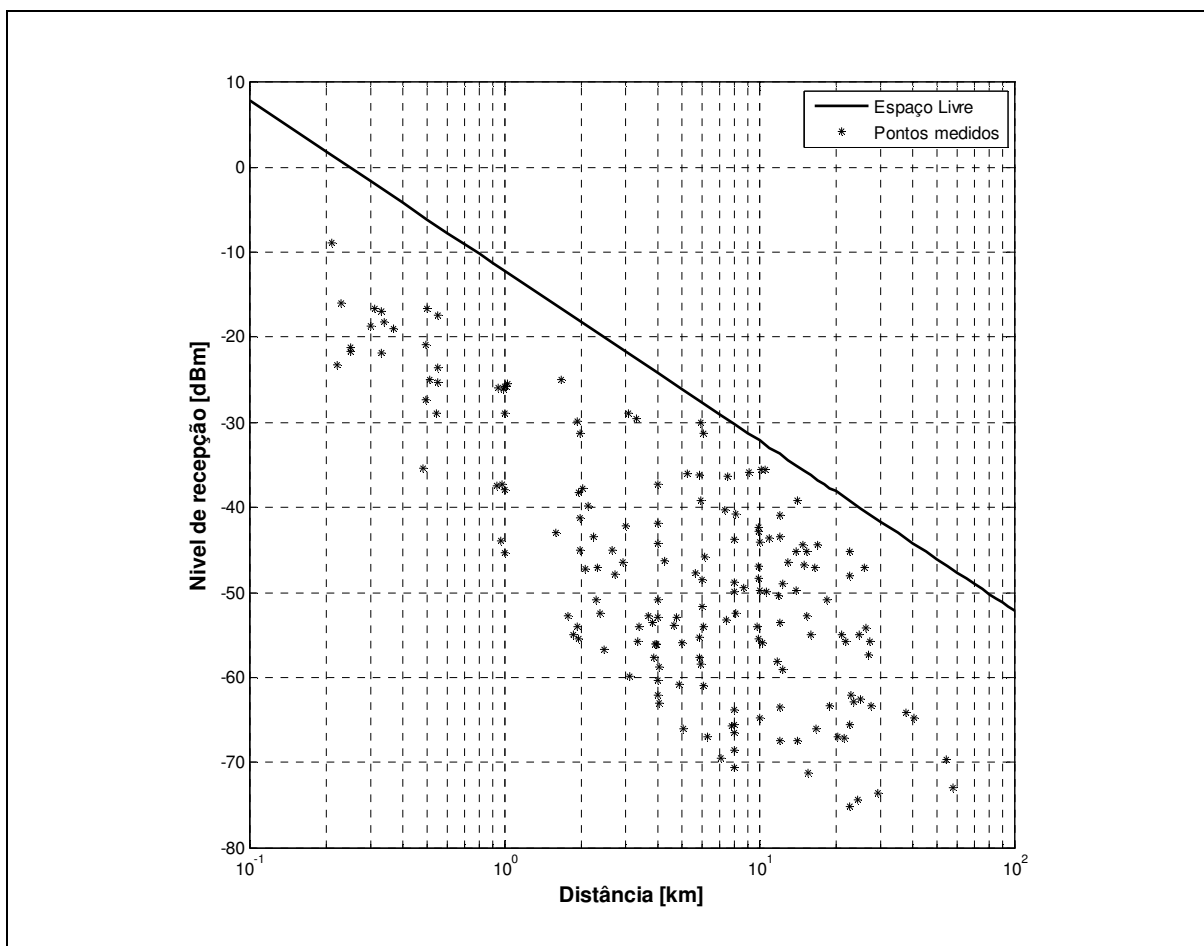


Figura 10 – Nível de recepção para o modelo de espaço livre

Fonte: Autoria própria

Comparando os valores estimados pelo modelo com os valores medidos, obtêm-se os resultados mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultado para o modelo de espaço livre

Condição	Erro médio [dB]	σ [dB]
Método de espaço livre	-20,8	22,9

Fonte: Autoria própria

A análise do gráfico da Figura 10 e dos dados da Tabela 2 mostra, claramente, que o modelo de espaço livre possui uma estimativa bastante otimista quando comparado com os valores medidos. Isto se deve ao fato que este método corresponde à atenuação devido à irradiação da potência do transmissor no espaço livre, considerando somente a distância até o

receptor. Portanto, este método estima a propagação para uma condição com linha de visada entre o transmissor e o receptor, que não é o caso estudado, onde há uma aglomeração urbana com prédios e construções, associado à topografia da região não ser plana.

Como este método apresenta a estimativa ideal de propagação, foi aplicado o método de Hata que considera as condições das aglomerações urbanas na circunvizinhança da antena transmissora.

5.2 MODELO DE HATA

O Modelo de Hata foi implementado conforme descrito na seção 3.3, para as condições de áreas urbanas em cidades grandes (CG) e em cidades pequenas e médias (CPM), e também para áreas suburbanas. O modelo de Hata para áreas urbanas em cidades pequenas e médias é citado pela recomendação ITU-R P.1546 e também pela Resolução Anatel nº 398.

A altura da antena transmissora considerada foi de 90m e a altura da antena receptora foi de 8m. Não foi feita consideração sobre a altura efetiva da antena transmissora para este método, pois o foco é a comparação entre as variantes do modelo com os dados básicos do sistema, ou seja, somente as alturas das antenas do transmissor e receptor em relação ao solo.

O gráfico da potência recebida em função da distância do receptor está apresentado na Figura 11, e comparando os valores estimados pelo modelo com os valores medidos, obtêm-se os resultados mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultado para o modelo de Hata

Condição	Erro médio [dB]	σ [dB]
Área urbana - cidades grandes (CG)	7,2	14,0
Área urbana - cidades pequenas e médias (CPM)	-0,8	12,0
Área suburbana	-9,9	15,6

Fonte: A autoria própria

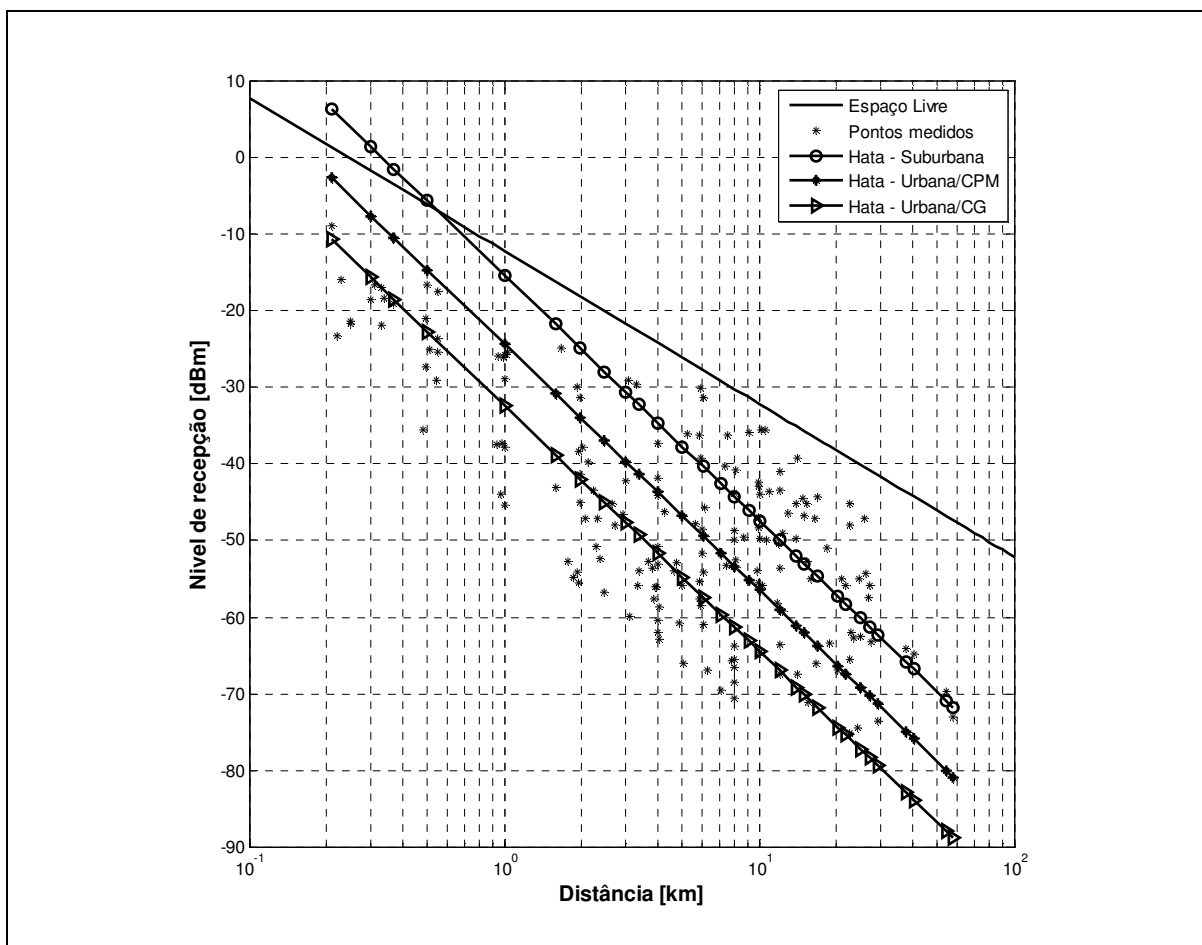


Figura 11 – Nível de recepção para as variantes do Modelo de Hata

Fonte: Autoria própria

Pode-se ver, claramente, pela análise do gráfico da Figura 11 que o modelo para áreas urbanas em grandes cidades estima uma atenuação maior da propagação, visto que o nível de recepção calculado é menor, considerando assim os obstáculos e reflexões de sinal devido à aglomeração urbana. Já o modelo para áreas suburbanas estima uma menor atenuação, pois considera que a região possui menos obstáculos e condições mais favoráveis à propagação.

Nota-se que a inclinação das três curvas é igual, porque conforme (16), a constante que multiplica o logaritmo da distância, ou seja, o termo $(44,9-6,55\log_{10}h_{te})$ depende somente da altura da antena transmissora, que permaneceu constante. Considerando a altura da antena transmissora $h_{te}=90\text{m}$ e calculando esta constante, obtém-se o valor igual a 32,1, ou seja, equivalente a um coeficiente de propagação $n=3,21$ do modelo log-distância. Adicionalmente, a diferença entre as curvas surge dos valores de constantes aplicadas, que são dependentes da frequência e altura da antena receptora, descritas na seção 3.3.

Analisando detalhadamente o gráfico da Figura 11, em relação ao espalhamento dos pontos medidos, observa-se que o modelo para áreas urbanas em grandes cidades se adapta

melhor para os pontos com distâncias próximas à antena, até aproximadamente 4km, e o modelo para áreas suburbanas se adapta melhor para os pontos mais afastados da antena, aproximadamente após 10km. Isto motivado, provavelmente, pela distribuição da aglomeração urbana da cidade que se concentra no centro e diminui na periferia e municípios vizinhos.

Pela análise dos dados da Tabela 3, a variante para áreas urbanas em cidades pequenas e médias é o modelo que possui menor erro médio, com um bom valor, de -0,8dB, mas o desvio padrão de 12,0dB indica um grande espalhamento das medidas.

Como não existe um único modelo de Hata que apresente uma estimativa da atenuação de propagação com baixo desvio padrão para todos os pontos, então foi selecionado o método da recomendação ITU-R P1546, que pela utilização de curvas obtidas empiricamente, possui características de estimativas da atenuação de propagação diferentes em função da distância. O conceito que o índice de propagação n varia com a distância é claramente apresentado pelo método de modelo de Perez-Vega e Zamanillo, descrito na seção 3.5.

5.3 ANÁLISE TOPOGRÁFICA

As condições de propagação são diretamente ligadas às condições do ambiente, portanto alguns modelos de propagação, como o caso do modelo de Hata e da recomendação ITU-R P1546, necessitam de dados da topografia do terreno da circunvizinhança da antena transmissora.

Para obter os dados topográficos da região de Curitiba, foi utilizado o Sistema de Informações Geográficas da Anatel (SIGAnatel) [19]. Esta é uma ferramenta que possui um banco de dados geográficos do Brasil, que, entre vários recursos, permite analisar a cobertura do sinal de uma estação de TV, analisar a propagação de um radioenlace ponto-a-ponto e gerar dados de perfil do terreno entre dois pontos. Esta base de dados não possui informações sobre a altura das edificações existentes, mas apresenta as regiões que possuem aglomeração urbana.

A base de dados das cotas do terreno da região de Curitiba, utilizada neste trabalho, foi gerada em forma polar, a partir das coordenadas da estação transmissora. As altitudes foram mapeadas em 72 azimutes, com passo de 5°, entre as distâncias de 0,09km até 60km, com

passo de 90m. As altitudes dos pontos medidos, em azimutes diferentes dos mapeados, foram obtidas por interpolação entre pontos da base de dados.

5.4 MODELO DA RECOMENDAÇÃO ITU-R P.1546

O modelo da recomendação ITU-R P.1546 foi implementado conforme descrito na seção 3.4, com as diversas curvas em função da altura da antena do transmissor e com a correção para frequência de transmissor. Os dados topográficos necessários foram obtidos conforme descrito na seção 5.3.

De modo a comparar os efeitos da altura média do terreno na determinação da altura efetiva da antena transmissora, foram calculadas as estimativas de propagação em três condições: altura efetiva igual à altura da antena ao solo ($h_t=h_a=90\text{m}$); altura efetiva calculada em função da distância e do azimute de cada ponto; e altura efetiva média dos pontos.

A altura efetiva da antena transmissora para cada ponto foi determinada conforme a média do nível do terreno na distância de separação entre o transmissor e o receptor, a partir dos dados obtidos no sistema SIGAnatel para o azimute correspondente, como descrito na seção 3.4, ou seja, para pontos com distância de separação menor que 15km, utilizando o critério de $0,2d$ e d , e para pontos com distância maior igual a 15km, utilizando o critério de 3km e 15km. A altura efetiva média foi obtida pela média das alturas efetivas de todos os pontos, resultando um valor de $h_t=122\text{m}$.

Adicionalmente foram inseridas as correções para percursos curtos urbanos e suburbanos, aplicáveis para distâncias inferiores a 15km, relacionados à obstrução dos prédios, considerando uma altura dos arredores de 30m; e a correção para a altura da antena receptora de 8m em relação à referência de 10m, para uma altura de cobertura do solo de 30m, ambas com a altura efetiva calculada para cada um dos pontos. O gráfico da potência recebida em função da distância do receptor para $h_t=h_a=122\text{m}$, sem utilizar correções, e para a altura efetiva h_{eff} , considerando algumas correções, está apresentado na Figura 12.

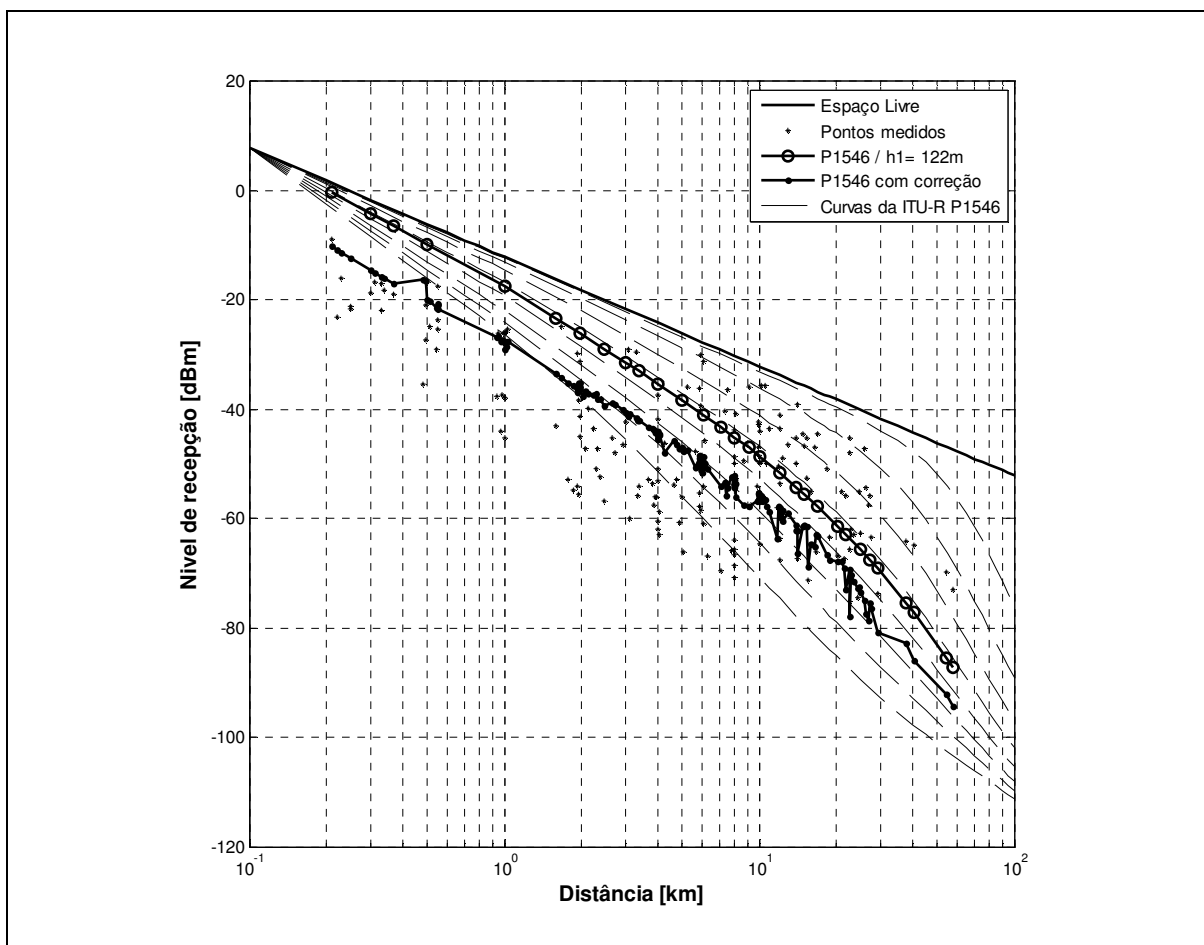


Figura 12 – Nível de recepção para o modelo da ITU-R P1546

Fonte: A autoria própria

Comparando os valores estimados pelo modelo com os valores medidos, obtêm-se os resultados mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultado para o modelo da ITU-R P1546

Condição	Erro médio [dB]	σ [dB]
Altura efetiva da antena com 90m	-5,4	14,1
Altura efetiva da antena para cada ponto	-7,4	14,3
Altura efetiva da antena com 122m	-7,5	14,6
Altura efetiva da antena para cada ponto com correção	1,4	12,0

Fonte: A autoria própria

Analisando o gráfico da Figura 12 nota-se que a estimativa de propagação do modelo possui um comportamento variável com a distância, e que como era de se esperar, no caso da altura da antena de 122m, a curva estimada fica entre as curvas de referência de 75m e 150m (quarta a quinta curvas de referência). Nota-se também que os pontos medidos estão muito dispersos, encontrando-se muitos pontos abaixo da curva de referência de 10m e alguns acima da curva de referência de 600m. Sem correção, a estimativa é otimista para as distâncias

próximas à antena, pois a curva tende para os valores do método de espaço livre, e é pessimista para os pontos mais afastados da antena. Com correção, a estimativa é ainda mais pessimista para os pontos mais afastados da antena.

Pela análise dos dados da Tabela 4, verifica-se que o erro médio considerando a altura efetiva e correções é um pouco maior que o modelo de Hata para áreas urbanas em cidades pequenas e médias, apresentando o mesmo desvio padrão. Mas ainda a estimativa da atenuação de propagação para todos os pontos resultou em um alto desvio padrão. Então se optou para a utilização do método log-distância, cuja curva é obtida por meio de regressão a partir das medidas obtidas no levantamento em campo.

5.5 MODELO LOG-DISTÂNCIA

O modelo de log-distância foi implementado conforme descrito na seção 3.1. Na avaliação, considerou-se a distância de referência d_0 igual a 0,21km, ou seja, a distância do transmissor ao ponto medido mais próximo da antena e $Pr(d_0)$ a média da potência recebida dos pontos medidos a 0,21km, ou seja, -11,75dBm.

Para obter o expoente n do modelo log-distância foi utilizada a regressão pelo método do erro médio quadrático mínimo (MMSE), conforme descrito em Rappaport [5]. O gráfico da potência recebida em função da distância do receptor está apresentado na Figura 13.

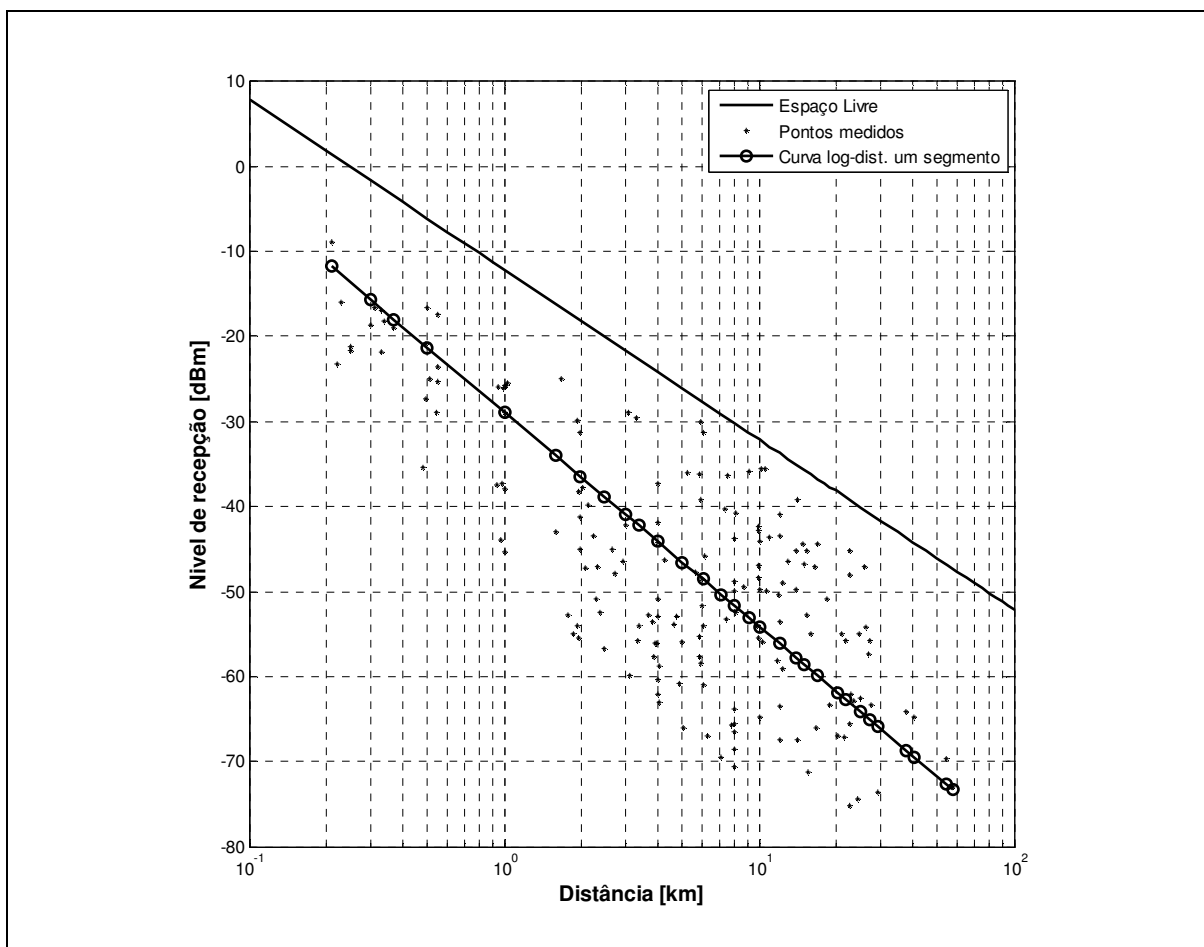


Figura 13 – Nível de recepção para o modelo log-distância de um segmento

Fonte: Autoria própria

Comparando os valores estimados pelo modelo com os valores medidos, obtêm-se os resultados mostrados na Tabela 5.

Tabela 5 – Resultado para o modelo log-distância de um segmento

Condição	n [adm]	Erro médio [dB]	σ [dB]
Curva log-distância de um segmento	2,53	-1,4	10,3

Fonte: Autoria própria

Conforme apresentado na Tabela 5, o expoente de propagação do modelo log-distância foi $n = 2,53$. Este valor indica que o decaimento do nível de recepção é maior que no caso da atenuação em espaço livre, ou seja, o ambiente causa perdas mais acentuadas do que na condição de espaço livre. Conforme [5], valores de n entre 2,7 e 3,5 indicam um ambiente em área urbana, valor coerente com o obtido, pois os pontos se encontram em áreas urbanas e suburbanas.

Ainda pela análise dos dados da Tabela 5, observa-se que o desvio padrão ficou menor que os modelos de Hata e da recomendação ITU-R P1546, o que já era esperado, devido à regressão utilizada pelo método, tornando um modelo específico para o conjunto de medidas.

Apesar do erro médio estar baixo, igual a -1,4dB, o desvio padrão ainda poderia ser melhorado. Assim foi utilizado o modelo log-distância de dois segmentos de modo a obter um ponto de joelho que permitisse a divisão do modelo em dois comportamentos de propagação diferentes.

5.6 MODELO LOG-DISTÂNCIA DE DOIS SEGMENTOS

O modelo log-distância de dois segmentos, descrito na seção 3.2, considera que existem duas condições de propagação, separadas por um ponto de joelho. A curva foi obtida pela dupla regressão do método log-distância, calculando-se o expoente de propagação n para cada segmento da curva. Os valores do ponto de referência d_0 e a potência de referência $Pr(d_0)$, do primeiro segmento, foram as mesmas utilizadas no método log-distância.

O processo de regressão foi iterativo, ou seja, para cada valor arbitrado ao ponto de joelho j_1 , variado entre 1km e 29km, encontrava-se, pelo método de MMSE, os dois expoentes de propagação n_1 e n_2 e, em seguida, calculava-se o desvio padrão entre os valores medidos e os valores estimados pelo modelo. A condição que obteve o menor desvio padrão foi a considerada para a análise, apresentada na Tabela 6.

O gráfico da potência recebida em função da distância do receptor está apresentado na Figura 14 e, comparando-se os valores estimados pelo modelo com os valores medidos, obtêm-se os resultados mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 – Resultado para o modelo log-distância de dois segmentos

Condição	n_1 [adm]	j_1 [km]	n_2 [adm]	Erro médio [dB]	σ [dB]
Curva log-distância de dois segmentos	3,25	2,5	1,15	-0,2	9,2

Fonte: Autoria própria

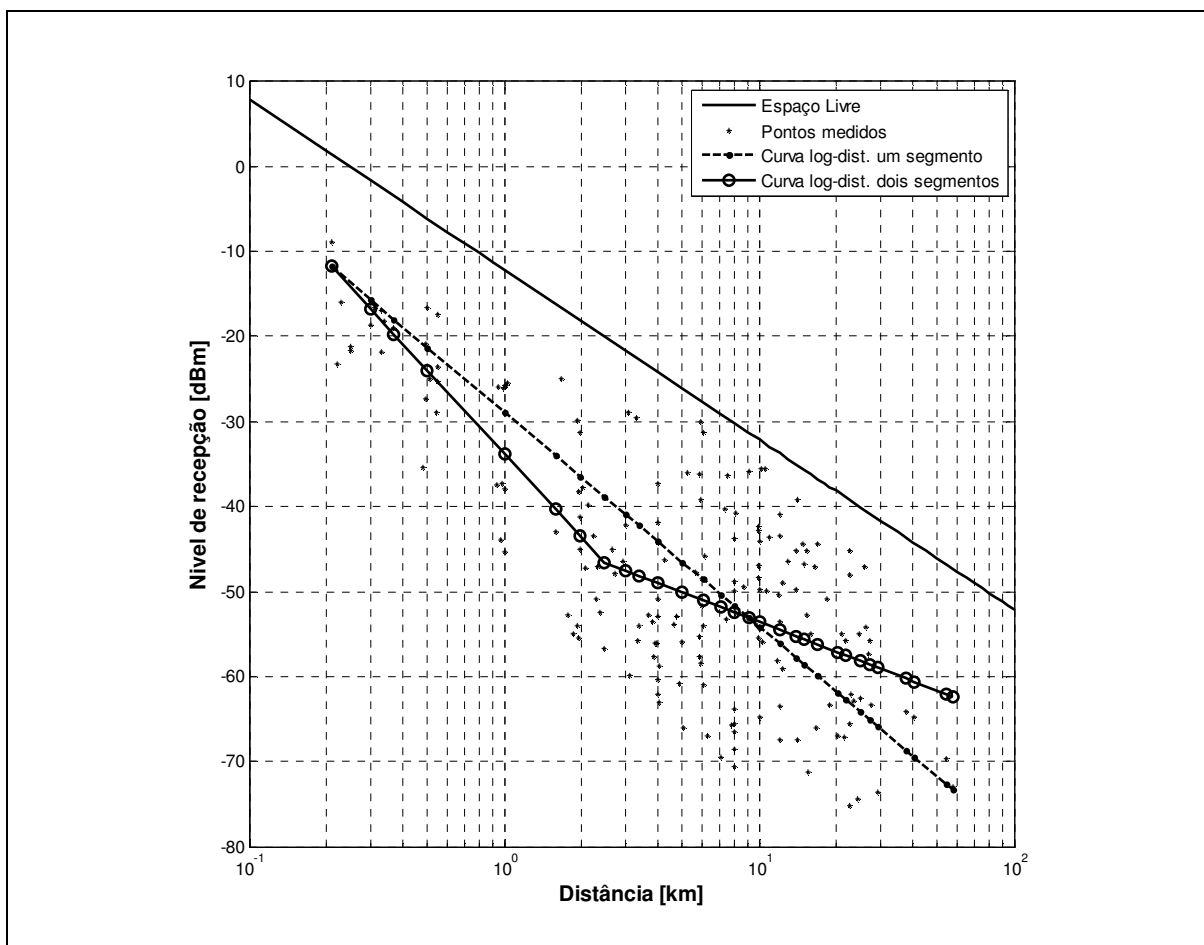


Figura 14 – Nível de recepção para o modelo log-distância de dois segmentos

Fonte: Autoria própria

Nota-se pela análise do gráfico da Figura 14, que o modelo adapta-se para as distâncias próximas à antena e, para os pontos mais afastados da antena, a estimativa é otimista e se afasta da tendência dos níveis dos pontos medidos, que é representada pela curva log-distância de um segmento.

Pela análise dos dados da Tabela 6, verifica-se que, como era esperada, a estimativa do modelo resultou um erro médio e um desvio padrão menores que no método log-distância com um segmento, indicando melhor ajuste da curva ao conjunto de pontos medidos.

Para determinar o ponto de joelho teórico, ou seja, a distância de liberação da primeira zona de Fresnel d_f para um modelo de dois raios, definida por (13) na seção 3.2, considerou-se a altura da antena transmissora h_t igual a 90m e a altura da antena receptora h_r igual a 8m, o que resultou na distância de joelho igual a 6,1km. Se for considerada a altura média efetiva da antena de 122m obtém-se a distância de joelho igual a 8,3km.

Pela análise dos dados da Tabela 6, observa-se que o ponto de joelho $j_1=2,5$ km encontrado é menor que o $d_f = 6,1$ km calculado, que o índice n_1 não está próximo de $n=2$ e n_2

não está próximo de $n=4$, como era esperado baseado nos fundamentos da seção 3.2. O índice $n_1=3,25$ é maior que índice da atenuação do espaço livre, indicando uma maior atenuação do sinal, o índice $n_2=1,15$ é menor que índice da atenuação do espaço livre. Isto pode ser motivado, provavelmente, pela predominância de pontos com níveis baixos, ou seja, grande atenuação, próximos da antena transmissora, devido à obstrução da densa aglomeração urbana, que provocou o deslocamento do ponto de joelho j_1 para 2,5km com conseqüentemente ajuste nos índices de propagação n_1 e n_2 .

Como a tendência da curva log-distância de dois segmentos está divergindo da tendência da curva log-distância de um segmento, e considerando que a aplicação de um modelo de propagação é a estimativa de cobertura do sinal transmitido, este método foi considerado como insatisfatório. Com o objetivo de propor um novo modelo, optou-se pela regressão tripla, de modo a obter mais um ponto de joelho.

5.7 MODELO LOG-DISTÂNCIA DE TRÊS SEGMENTOS

O modelo log-distância de três segmentos considera que existem três condições de propagação, separadas por dois pontos de joelho. Como o modelo de dois segmentos não obteve um ponto de joelho onde o segundo índice de propagação é maior que o primeiro, foi, então, utilizado um modelo com regressão tripla, com um segundo ponto de joelho, mais afastado da antena. Os valores do ponto de referência d_0 e da potência de referência $Pr(d_0)$, necessários na determinação do primeiro segmento, foram os mesmos utilizados no método log-distância.

O processo foi iterativo, variando, o primeiro ponto de joelho j_1 entre 1km e 8,5km, e o segundo ponto de joelho j_2 entre 9km e 29km, calculavam-se os expoentes de propagação n_1 , n_2 e n_3 , e, em seguida, o desvio padrão entre os valores medidos e o estimados pelo modelo. O conjunto de valores que obteve o menor desvio padrão na regressão foi o considerado para a análise, apresentado na Tabela 7. Adicionalmente foi feita uma nova iteração com a condição que o índice de propagação n_2 fosse estritamente positivo, e obteve-se um novo conjunto de valores, também apresentado na Tabela 7.

O gráfico da potência recebida em função da distância do receptor está apresentado na Figura 15.

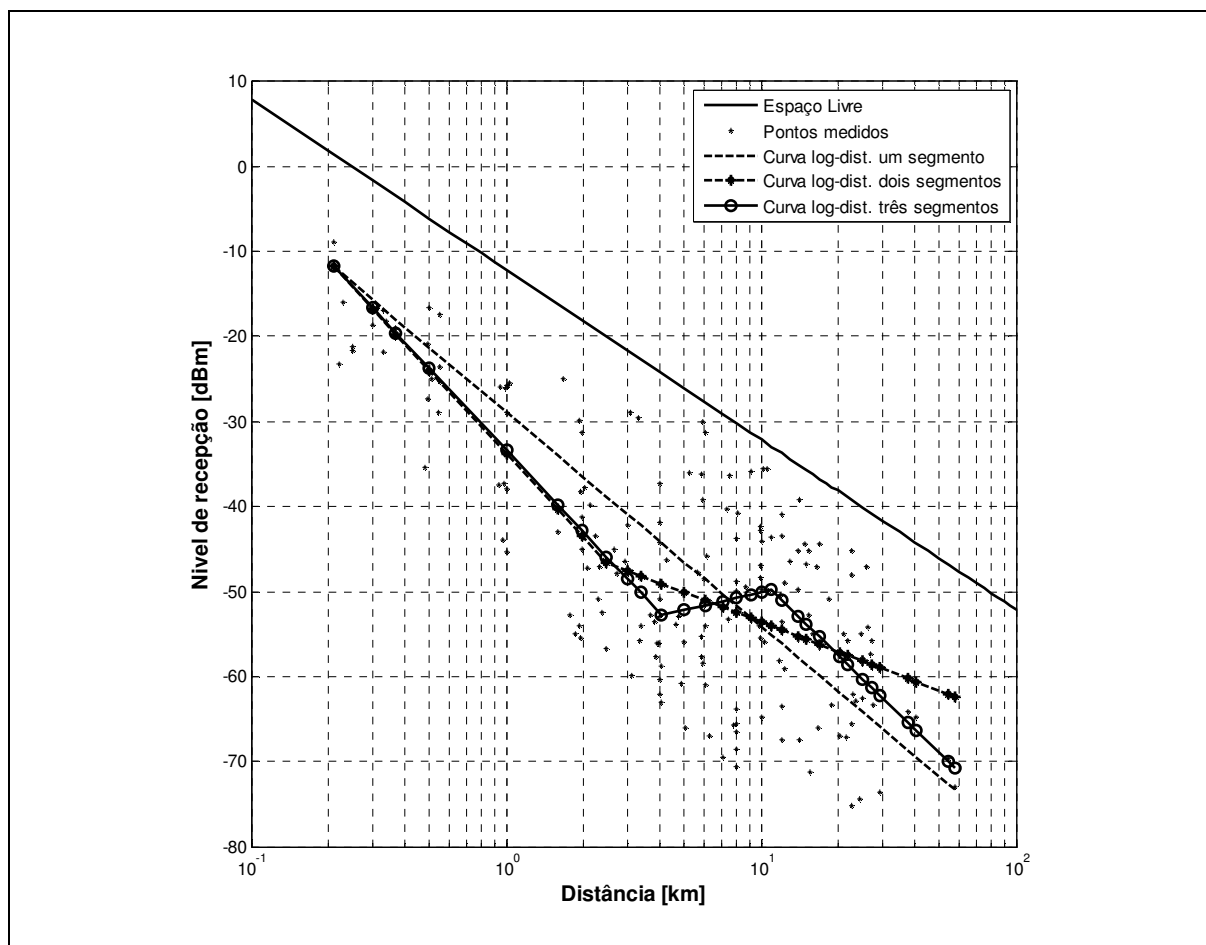


Figura 15 – Nível de recepção para o modelo log-distância de três segmentos

Fonte: Autoria própria

Comparando os valores estimados pelo modelo com os valores medidos, obtêm-se os resultados mostrados na Tabela 7.

Tabela 7 – Resultado para o modelo log-distância de três segmentos

Condição	n_1 [adm]	j_1 [km]	n_2 [adm]	j_2 [km]	n_3 [adm]	Erro médio [dB]	σ [dB]
Curva log-distância de três segmentos	3,18	4,1	-0,68	10,9	2,90	-0,2	8,93
Curva log-distância de três segmentos com n_2 positivo	3,17	3,7	0,02	14,0	3,51	-0,4	8,95

Fonte: Autoria própria

Pode-se ver pela análise do gráfico da Figura 15 que o modelo adapta-se para as distâncias próximas à antena e, para os pontos mais afastados da antena, é mais realista que os modelos log-distância de um e dois segmentos.

Pela análise dos dados da Tabela 7, observa-se que o ponto de joelho encontrado $j_2=10,9\text{km}$ é mais coerente quando comparado com o valor calculado $d_f=6,1\text{km}$, para $h_{tx}=90\text{m}$, ou $d_f=8,3\text{km}$, para $h_{tx}=122\text{m}$, em relação ao valor obtido de $j_1=2,5\text{km}$ no modelo log-distância

de dois segmentos. Também, o índice $n_3=2,90$ é mais próximo do valor teórico esperado $n=4$, quando comparado com o modelo log-distância de dois segmentos, onde $n_2=1,15$. Como era esperado, o desvio padrão foi menor que o modelo log-distância de um e de dois segmentos.

Este modelo resultou o índice n_2 negativo, que minimizou o MMSE na regressão, mas que não possui uma explicação física. Assim este modelo, com estes valores de n e j não foi considerado como adequado para ser utilizado na estimativa da propagação.

A regressão com a condição do índice de propagação ser estritamente positivo, modifica os valores dos resultados obtidos, onde o índice n_2 é aproximadamente zero, mas não trás nenhuma interpretação relevante.

Pela análise da Figura 15, nota-se que o primeiro segmento da curva de três segmentos é aproximadamente igual ao primeiro segmento da curva de dois segmentos, e verificando-se que existe um ponto de cruzamento entre a curva de dois segmentos e o terceiro segmento da curva de três segmentos, isto motivou a proposição do modelo log-distância misto.

5.8 MODELO LOG-DISTÂNCIA MISTO

O modelo log-distância misto também considera que existem três condições de propagação, separadas por dois pontos de joelho. Como o modelo de três segmentos obteve um segundo joelho com um índice de propagação mais próximo do $n=4$, estudado na teoria, mas com um índice n_2 negativo, foi investigado um outro modelo de propagação.

Este modelo proposto considera três segmentos, onde o primeiro e segundo segmentos possuem os índices de propagação n_1 e n_2 iguais ao do modelo log-distância de dois segmentos e o terceiro índice de propagação n_3 igual ao do modelo log-distância de três segmentos. O primeiro joelho j_1 é igual ao joelho do modelo log-distância de dois segmentos e o segundo joelho j_2 , é o ponto de encontro entre as curvas dos modelos log-distância de dois e três segmentos. O processo de regressão foi o mesmo utilizado no modelo log-distância de três segmentos, bastante simplificado porque os pontos de joelho j_1 e j_2 já estavam definidos.

Por meio do resultado encontrado nas análises das curvas de dois e três segmentos, foi obtido o ponto de encontro das curvas em 19,0km, e realizada uma análise para verificar este novo modelo proposto. Adicionalmente, realizou-se uma nova análise para obter o índice de propagação n_3 por meio da regressão pelo método do erro médio quadrático mínimo, somente do terceiro segmento após o joelho de 19,0km.

O gráfico da potência recebida em função da distância do receptor está apresentado na Figura 16.

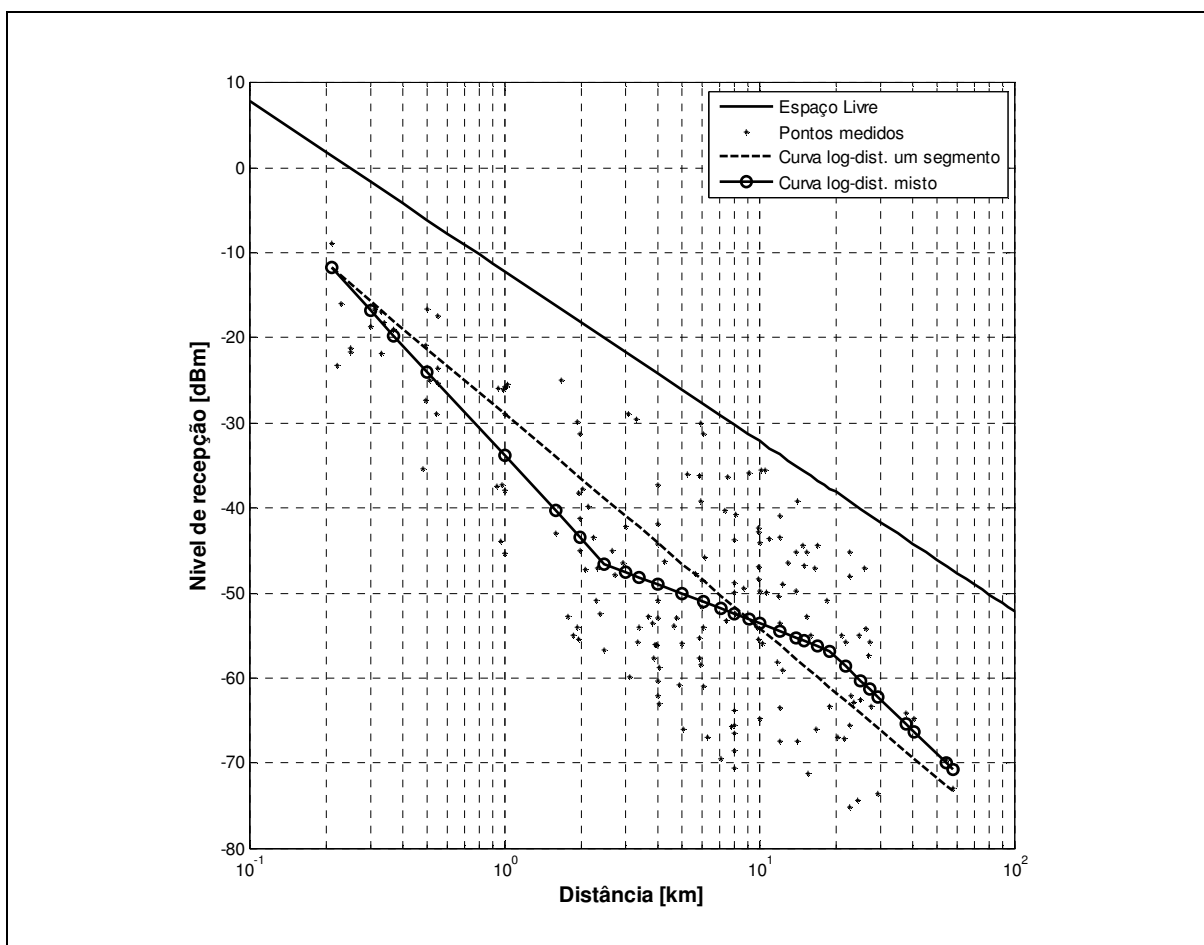


Figura 16 – Nível de recepção para o modelo log-distância misto

Fonte: Autoria própria

Comparando os valores estimados pelo modelo com os valores medidos, obtêm-se os resultados mostrados na Tabela 8.

Tabela 8 – Resultado para o modelo log-distância misto

Condição	n_1 [adm]	j_1 [km]	n_2 [adm]	j_2 [km]	n_3 [adm]	Erro médio [dB]	σ [dB]
Curva log-distância misto	3,25	2,5	1,15	19,0	2,90	0,2	9,13
Curva log-distância misto com n_3 ajustado	3,25	2,5	1,15	19,0	2,95	0,2	9,13

Fonte: Autoria própria

A análise do gráfico da Figura 16 mostra que o modelo adapta-se para as distâncias próximas à antena e, para os pontos mais afastados da antena a estimativa é mais realista.

Pela análise dos dados da Tabela 8, observa-se que o ponto de joelho $j_2=19,0\text{km}$ encontrado afasta-se do calculado $d_f=6,1\text{km}$, para $h_{tx}=90\text{m}$, ou $d_f=8,3\text{km}$ para $h_{tx}=122\text{m}$, e,

também, que o índice $n_3=2,90$ é mais próximo do valor $n=4$ cujo valor se verificou na teoria. Para o caso do modelo misto com o ajuste do índice de propagação n_3 para o trecho após o joelho de 19,0km, não houve melhoria porque o desvio padrão manteve-se o mesmo, dentro da aproximação utilizada de três casas decimais.

O modelo proposto possui um desvio padrão ligeiramente maior que o do modelo de três segmentos, mas ainda é menor que o modelo de um e dois segmentos; e, adicionalmente, a tendência da curva se ajusta ao conjunto de pontos medidos, podendo ser utilizado para uma estimativa de cobertura do sinal.

A equação da atenuação por propagação do modelo log-distância misto PL_{LDM} é dada por:

$$PL_{LDM}(d) = \begin{cases} 32,5 \log_{10}(d/0,21) + 87,29, & 0,21 \leq d < 2,5km \\ 11,5 \log_{10}(d/2,5) + 122,25, & 2,5 \leq d < 19,0km \\ 29,0 \log_{10}(d/19) + 132,38, & 19,0 \leq d \end{cases} \quad (27)$$

onde d é a distância entre a antena transmissora e o receptor, em quilômetros.

5.9 COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS

Após a obtenção do modelo empírico log-distância de três segmentos misto foram realizadas comparações entre alguns modelos.

Primeiramente foi feita a comparação do modelo misto com os valores médios da potência recebida nos pontos. A média da potência recebida foi calculada para vários trechos de distâncias de modo a permitir a visualização do comportamento médio da propagação na região, por exemplo, para as distâncias de até 1km, 10km, 20km e acima de 20km utilizaram-se as faixas de trechos de 0,2km, 1km, 2km e 5km, respectivamente, resultando em um número médio de seis pontos por trecho. O gráfico da potência recebida média comparada com o modelo misto e o modelo log-distância de um segmento, em função da distância do receptor, está apresentado na Figura 17.

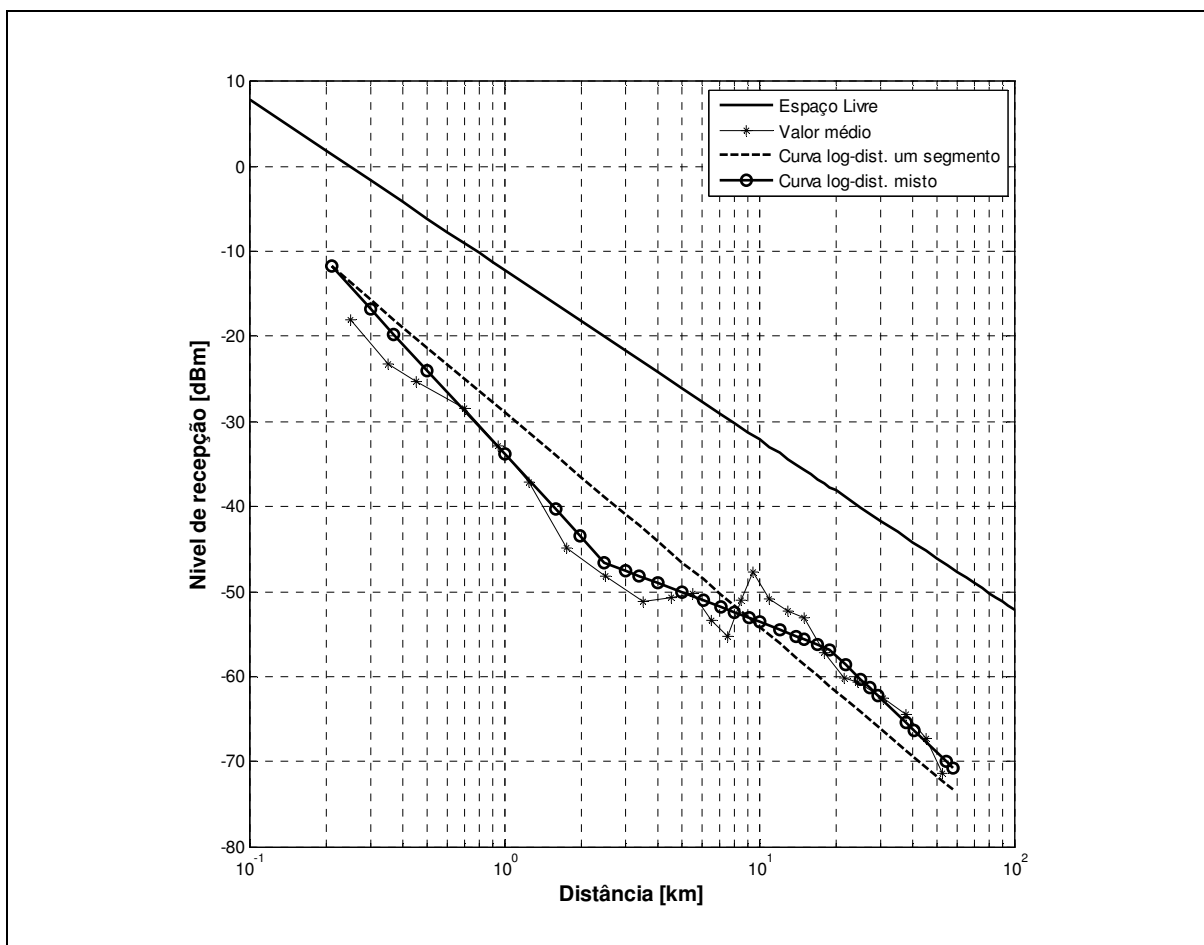


Figura 17 – Nível de recepção médio e dos modelos log-distância de um segmento e misto

Fonte: Autoria própria

Pela análise do gráfico da Figura 17, nota-se que a curva do modelo misto acompanha a média do sinal de recepção medido nos pontos, indicando ser um modelo adequado para as condições da região. O gráfico mostra que há um ponto de cruzamento da curva log-distância de um segmento e do modelo misto na distância de 9,1km, onde há uma mudança de comportamento do nível médio de recepção medido nos pontos, e conseqüentemente na estimativa do modelo misto. Antes deste ponto, desde o primeiro ponto medido, o nível médio está abaixo da curva log-distância e, após o ponto até o último ponto medido, o nível médio está acima da curva log-distância. Então, pode-se considerar que existem dois comportamentos da propagação na região. Não foi possível determinar claramente se este ponto é devido à liberação da primeira zona de Fresnel que foi calculada, para uma altura efetiva média de 122m, em 8,3km, ou isto se deve ao fato da região urbana densamente habitada da cidade de Curitiba estar espalhada até uma distância média, aproximada, de 10km.

Na segunda análise, foi realizada uma comparação do modelo misto com os modelos de Hata para área urbana em cidades grandes e em cidades pequenas e médias, além da área suburbana. O gráfico da potência recebida em função da distância do receptor está apresentado na Figura 18.

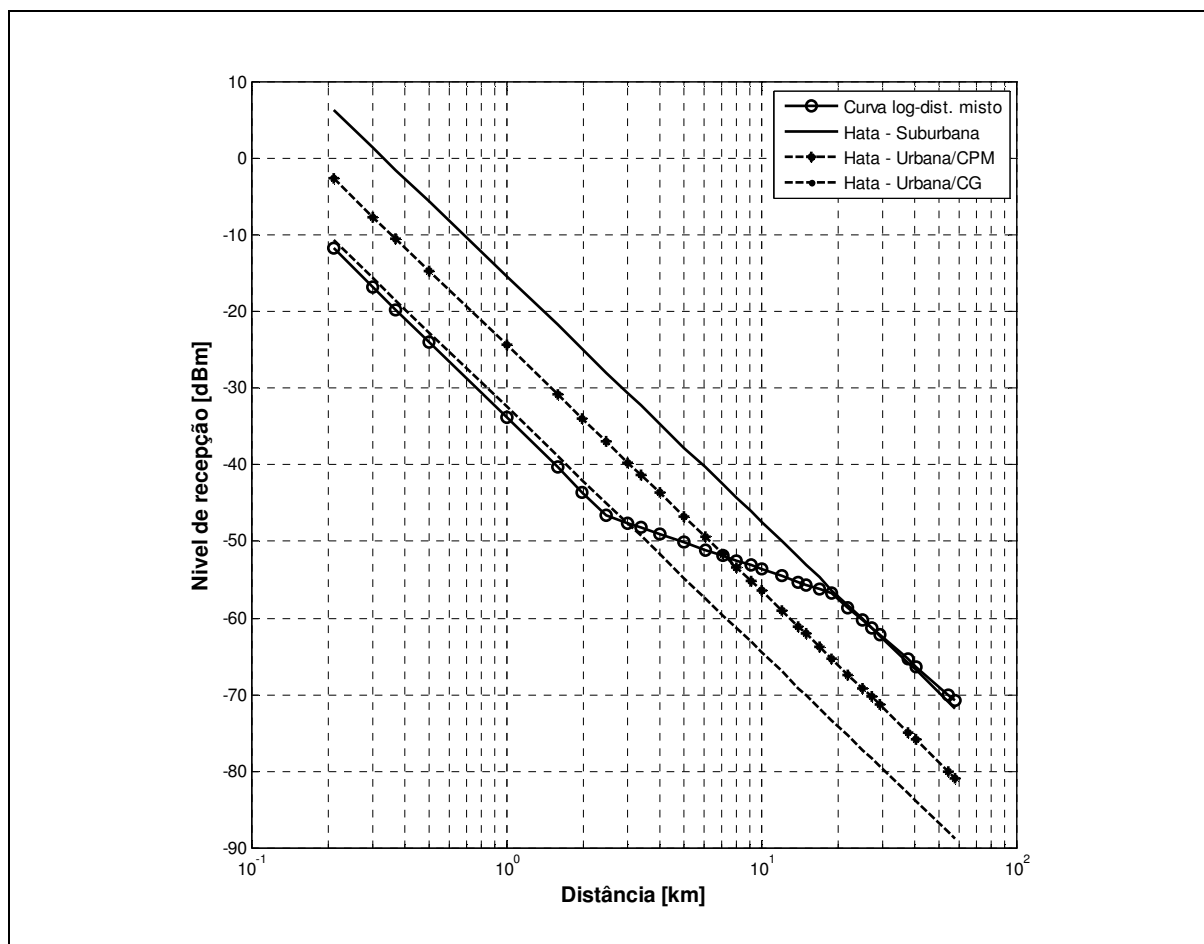


Figura 18 – Nível de recepção dos modelos log-distância e de Hata

Fonte: Autoria própria

Pode-se observar pela análise do gráfico da Figura 18 que o primeiro segmento do modelo misto adapta-se à estimativa do modelo de Hata para área urbana em cidades grandes, até a distância de aproximadamente 3km⁴, onde o índice de propagação do modelo misto $n_1=3,25$ é aproximadamente igual ao $n=3,21$ do modelo de Hata, determinado na seção 5.2. O terceiro segmento do modelo misto adapta-se ao modelo de Hata para área suburbana, após a distância de 19,0km, onde o índice de propagação do modelo misto $n_3=2,90$ é aproximadamente igual ao $n=3,21$ do modelo de Hata. Pode-se, então, inferir que o modelo misto possui características do modelo de Hata para área urbana em cidades grandes e para

⁴ Distancia onde a curva do modelo misto cruza a curva de Hata para área urbana em cidades grandes.

área suburbana, ou seja, que o modelo log-distância misto também é um misto dos modelos de Hata.

Na terceira análise, foi realizada uma comparação do modelo misto com o modelo da recomendação ITU-R P.1546. O gráfico da potência recebida em função da distância do receptor está apresentado na Figura 19.

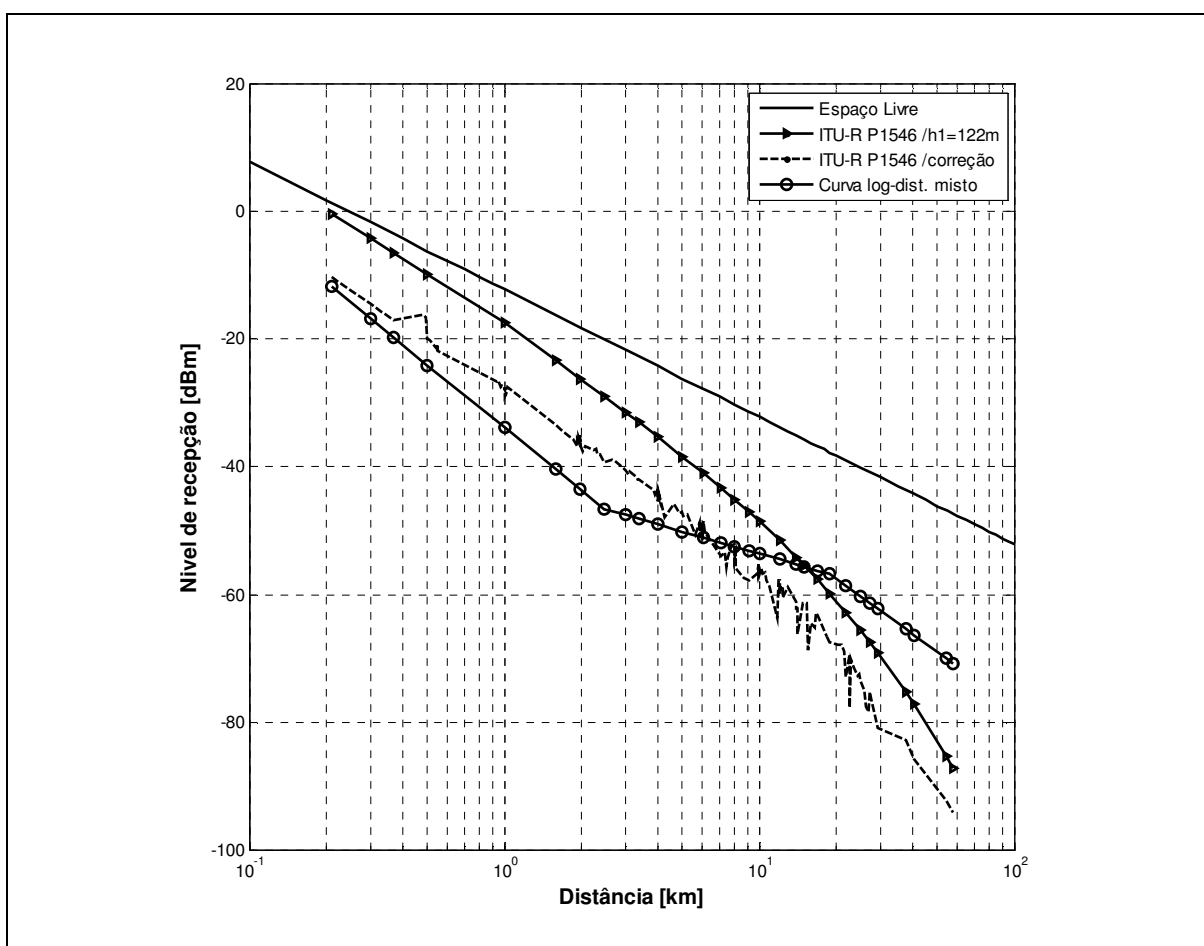


Figura 19 – Nível de recepção dos modelos log-distância misto e ITU-R P.1546

Fonte: Autoria própria

A análise do gráfico da Figura 19 mostra que os modelos log-distância misto e da recomendação ITU-R P.1546 possuem estimativas de propagação distintas. O modelo da ITU-R P.1546, no início da curva, tende mais para a estimativa do modelo em espaço livre do que o modelo misto, e no final da curva o modelo da ITU-R P.1546 tem uma estimativa mais pessimista que o modelo misto, além de possuir um índice de propagação mais acentuado.

Uma quarta análise tratou da comparação detalhada dos modelos misto, de Hata para área suburbana e da recomendação ITU-R P.1546, para a região além de 9,1km. Um gráfico detalhado da potência recebida em função da distância do receptor está apresentado na Figura 20.

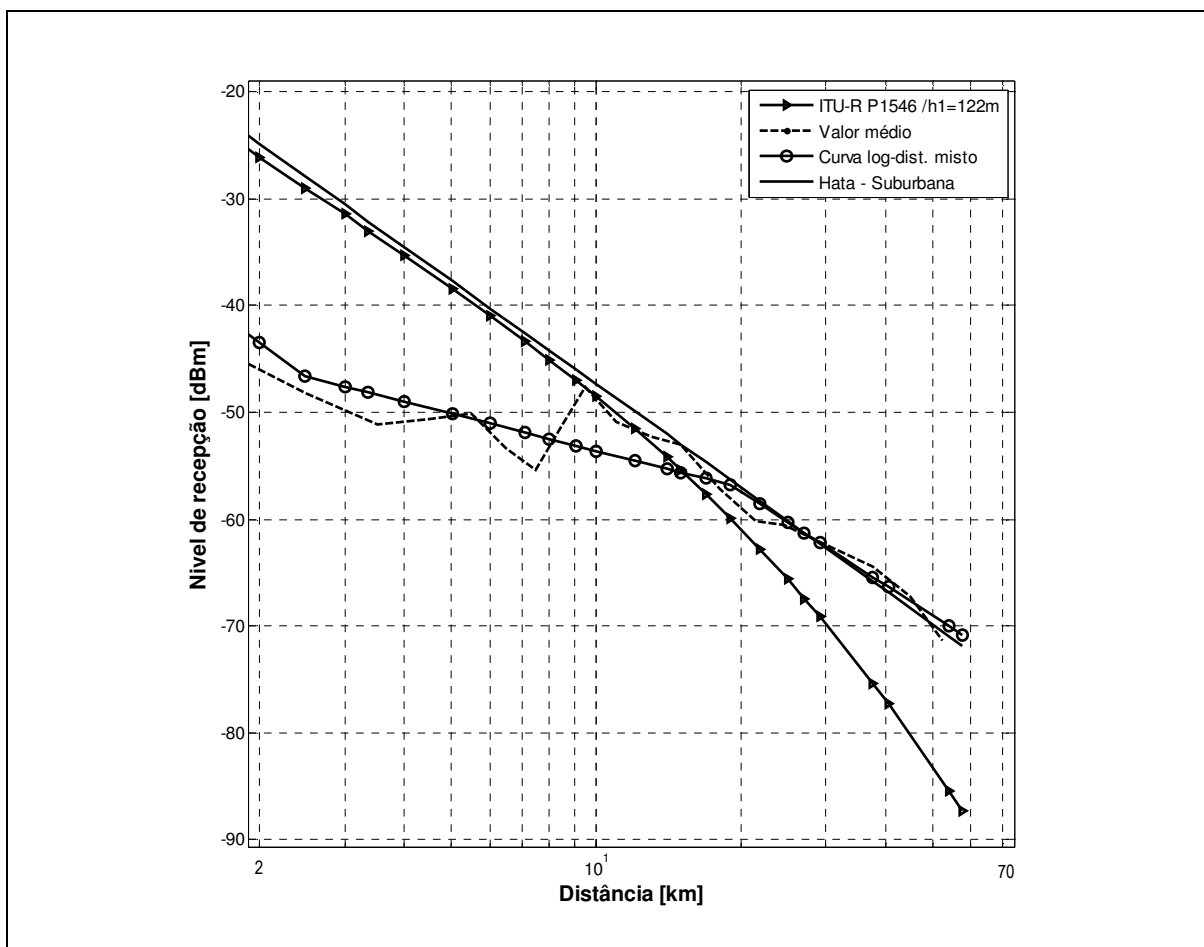


Figura 20 – Detalhe do nível de RX médio e dos modelos misto, ITU-R P.1546 e de Hata

Fonte: Autoria própria

Por meio da análise do gráfico da Figura 20 nota-se que no trecho de 9,1km, ponto de cruzamento da estimativa do modelo log-distância de um segmento e misto, e 19,0km, ponto do segundo joelho do modelo misto, há uma melhor adaptação do modelo de Hata para área suburbana e da recomendação ITU-R P.1546 ao nível médio de recepção medido nos pontos.

Adicionalmente, na tentativa de interpretar o comportamento da propagação em relação a alguns pontos de joelho analisados, obteve-se, no sistema SIGAnatel [19], a distribuição da aglomeração urbana da região de Curitiba, centralizado no local da antena transmissora, que é apresentada na Figura 21. As áreas escuras representam regiões com concentração urbana, as linhas escuras indicam o limite dos municípios e os círculos indicam as distâncias de 4,1km, 9,1km e 19,0km, referentes à, respectivamente, distância do ponto de joelho j_1 do modelo log-distância de três segmentos, distância onde a curva do modelo misto cruza com a curva do modelo log-distância de um segmento, e distância do ponto de joelho j_2 do modelo misto.

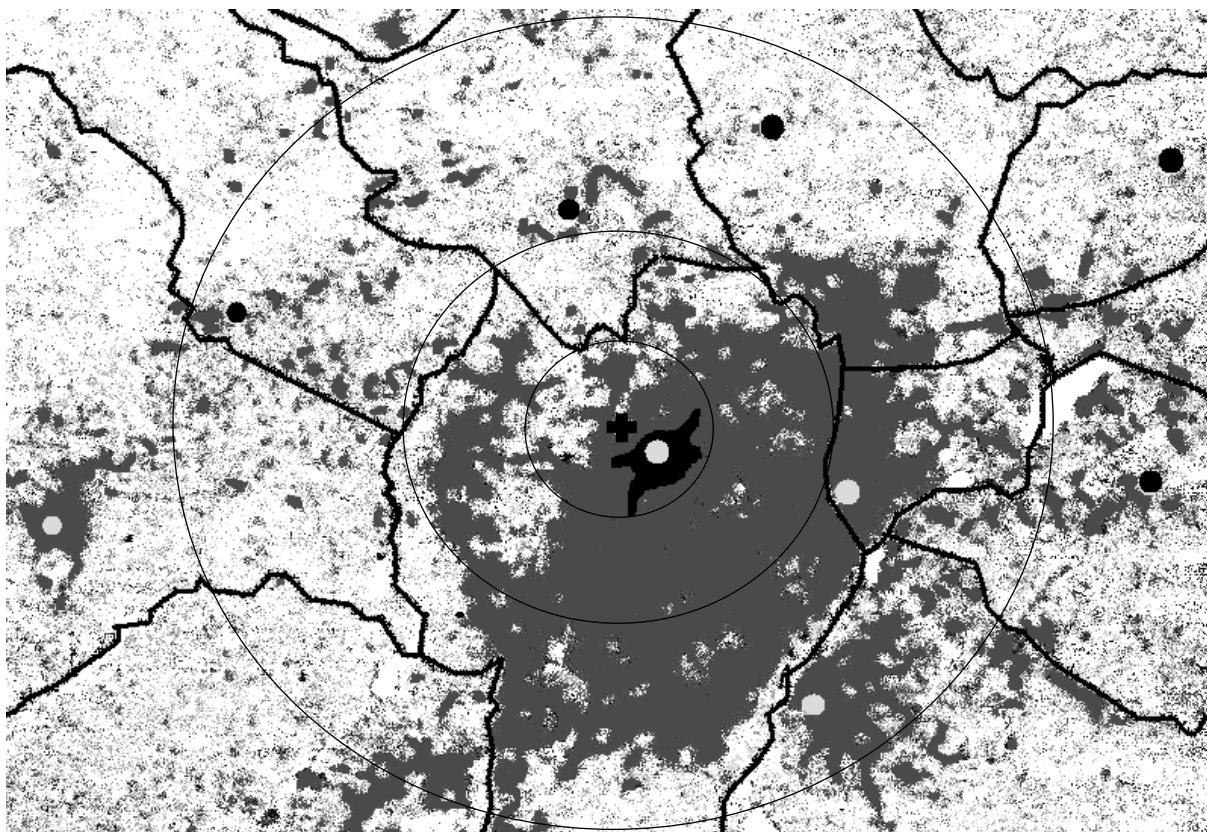


Figura 21 – Aglomeração urbana na região de Curitiba

Fonte: Adaptado do sistema SIGAnatel

Pode-se notar que o centro da cidade está localizado no círculo de 4,1km da antena transmissora, onde há a maior concentração de edifícios, e, conseqüentemente, há a maior atenuação do sinal de radiofrequência devido à obstrução. O ponto de joelho j_1 do modelo misto em 2,5km representa, provavelmente, o ponto onde a densa aglomeração urbana estaria terminando, modificando o comportamento da propagação. A partir de 19,0km, ponto de joelho j_2 do modelo misto, observa-se uma região suburbana da cidade, com baixa aglomeração urbana. A distância de 9,1km, onde há uma mudança do comportamento da atenuação da propagação, está em uma região intermediária entre a grande aglomeração urbana e regiões suburbanas, indicando, provavelmente, uma mudança no perfil das construções a partir desta distância.

Após as análises anteriores, pode-se inferir que existem modelos que melhor se adaptam para as condições ambientais da região, e que estes comportamentos estão sendo traduzidos pela aproximação das estimativas de propagação ao nível médio de recepção medido nos pontos, para diferentes trechos da distância de separação entre o transmissor e o receptor. Assim foi realizada uma comparação dos valores estimados pelo modelo com os valores medidos, para trechos de distâncias, obtendo-se os resultados mostrados na Tabela 9.

Tabela 9 – Resultado para trechos da cobertura

Método de propagação	Distâncias [km]	Erro médio [dB]	σ [dB]
Log-distância misto – segmento 1	0,21 a 4,1	-1,1	7,9
Hata – área urbana cidades grandes	0,21 a 4,1	-1,1	7,8
Hata – área urbana cidades pequenas e médias	4,1 a 9,1	-1,5	11,9
Log-distância misto	4,1 a 9,1	-0,9	11,5
Log-distância misto	9,1 a 19,0	4,1	9,9
Rec. ITU-R P.1546	9,1 a 19,0	1,4	8,5
Hata – área suburbana	9,1 a 19,0	0,3	8,9
Rec. ITU-R P.1546 – altura efetiva	19,0 a 57,7	6,0	10,6
Log-distância com um segmento	19,0 a 57,7	3,1	8,6
Hata – área suburbana	19,0 a 57,7	-0,3	8,1
Log-distância misto – segmento 3	19,0 a 57,7	-0,7	8,1

Fonte: Autoria própria

Pela análise dos dados da Tabela 9, pode-se ver que para o trecho de 0,21 a 4,1km, os métodos log-distância misto e de Hata para área urbana em cidades grandes têm resultado aproximados. Para o trecho de 9,1km a 19,0km, o modelo de Hata para área suburbana tem o melhor resultado. Para o trecho de 19,0 a 57,7km, após o segundo ponto de joelho do modelo misto, este modelo possui um resultado levemente pior, no erro médio, que o modelo de Hata mas com valores idênticos no desvio padrão. Entretanto o modelo misto pode não ser o melhor modelo em cada trecho, mas certamente é o melhor considerando todo o conjunto de medidas, portanto é indicado para ser utilizado na estimativa da cobertura dos sinais da TV Digital na região.

5.10 ESTIMATIVA DA COBERTURA DE TRANSMISSÃO

Após obter um modelo de propagação adequado para a cidade de Curitiba, é possível estimar a distância de cobertura do sinal da TV Digital para os parâmetros considerados. Segundo a norma ABNT NBR 15604 [20] que regulamenta os receptores de TV digital, a sensibilidade de recepção deve ser menor que -77,0dBm na entrada do receptor.

A partir dos modelos considerados nas seções 5.1 até 5.8, e considerando o nível mínimo de -77,0dBm, por meio de uma extrapolação das curvas obtidas em cada modelo estudado, foi calculada a distância limite entre o transmissor e o receptor que atende esta condição, apresentada na Tabela 10.

Tabela 10 – Resultado da distância de cobertura para cada modelo

Modelo de propagação	Distância [km]
Hata - área urbana - cidades grandes	24
ITU-R P.1546 com altura efetiva de 122m	40
Hata - área urbana - cidades pequenas e médias	43
Log-distância de um segmento	81
Hata - área suburbana	81
Log -distância misto	95
Log -distância de dois segmentos	>150

Fonte: Autoria própria

Verifica-se pela análise dos dados da Tabela 10 que os modelos de Hata para área urbana em cidades grandes e em cidades pequenas e médias, e o método da ITU-R P1546 obtiveram estimativas pessimistas na distância média de cobertura entre 24 a 43km. Os modelos de Hata para área suburbana e log-distância de um segmento obtiveram estimativas de cobertura médias idênticas com uma distância de 81km, sendo uma coincidência porque estes modelos possuem curvas e pontos de origem diferentes. O modelo log-distância misto que foi considerado o indicado para a avaliação da cobertura, e por se tratar de um modelo ponto-área, obteve uma distância média de 95km. Como era esperado, o modelo da curva log-distância de dois segmentos não convergiu o resultado até a distância máxima de 150km.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo apresenta-se um resumo dos resultados apresentados no capítulo anterior, a comparação com outros trabalhos e as considerações finais.

6.1 RESUMO DOS RESULTADOS OBTIDOS

A Tabela 11 apresenta um resumo dos resultados que foram descritos no Capítulo 5.

Tabela 11 – Resumo dos resultados obtidos

Método de propagação	Erro médio [dB]	σ [dB]
Espaço livre	-20,8	22,9
Hata - área urbana - cidades grandes	7,2	14,0
Hata - área urbana - cidades pequenas e médias	-0,8	12,0
Hata - área suburbana	-9,9	15,6
ITU-R P.1546 com altura efetiva de 90m	-5,4	14,1
ITU-R P.1546 com altura efetiva pontual e com correção	1,4	12,0
Log-distância de um segmento	-1,4	10,3
Log-distância de dois segmentos	-0,2	9,2
Log-distância de três segmentos	-0,2	8,9
Log-distância misto	0,2	9,1

Fonte: Autoria própria

Verifica-se pela análise dos dados da Tabela 11 que o método log-distância misto é o que melhor modela o conjunto completo de medidas da potência de recepção. Apesar do desvio padrão ligeiramente menor apresentado pelo método log-distância de três segmentos, que foi obtido pela regressão tripla das medidas dos pontos, este foi descartado porque possui um segmento com n negativo que não tem interpretação física. Os outros modelos, mesmo obtendo um erro médio baixo, ainda apresentam um desvio padrão maior que o modelo misto.

Na análise da cobertura, a Tabela 12 apresenta um resumo dos resultados obtidos na seção 5.10.

Tabela 12 – Resumo da distância de cobertura

Modelo de propagação	Distância [km]
Log-distância de um segmento	81
Hata - área suburbana	81
Log-distância misto	95

Fonte: Autoria própria

Verifica-se pela análise dos dados da Tabela 12 que a estimativa de cobertura do modelo log-distância misto foi de 95km, estando próximo dos resultados obtidos pelos métodos de Hata para área suburbana e log-distância de um segmento. Na análise de cobertura, uma pequena diferença no valor do índice de propagação n pode resultar em uma grande diferença na estimativa da distância média de cobertura do sinal.

6.2 COMPARAÇÃO DO DESVIO PADRÃO COM A LITERATURA

Para comparar os resultados obtidos neste trabalho, foram pesquisados alguns trabalhos similares, de onde foi possível coletar os erros médios e desvios padrão obtidos entre as estimativas dos métodos aplicados e os valores medidos. Na literatura, procuraram-se artigos com levantamentos de propagação em UHF, principalmente nas faixas de 400MHz, 900MHz, 1,8GHz e 2,4GHz, com aplicações de radiodifusão, comunicação móvel e comunicação de dados.

Na descrição dos modelos de propagação em ambientes externos, Rappaport [5], de um modo geral, cita que os desvios padrão comuns entre as atenuações por propagação medidas e estimadas, considerando o método de Okumura que é a base do método de Hata, está na faixa de 10dB a 14dB. Estes valores também são citados por Goldsmith [21]. Portanto o desvio padrão de 9,1dB para o modelo log-distância misto apresenta uma boa precisão.

No levantamento realizado por Graham *et al* [4], com um transmissor de teste transmitindo em 450MHz, utilizando um veículo com um sistema de medição, percorrendo rotas de até 30km em áreas urbanas, suburbanas e rurais, foram coletadas 6987 amostras de medição. Utilizando de um sistema computacional, e dispondo dos dados topográficos da região, quando aplicando o método da recomendação ITU-R P526 obteve-se um erro médio de -1,4dB com um desvio padrão de 8,2dB. Na aplicação do método da recomendação ITU-R P1546, sem as correções da aglomeração urbana, foi obtido um erro médio de 14,3dB com um desvio padrão de 14,9dB, e com as correções da aglomeração urbana, obteve um erro médio de 3,5dB com um desvio padrão de 16,8dB. Na aplicação do método de Hata, sem as correções da aglomeração urbana, o erro médio foi de 14,1dB com um desvio padrão de 12,3dB. Considerando que no levantamento de Graham *et al* [4] foram utilizados cálculos ponto-a-ponto, as condições do perfil e da aglomeração urbana em torno de cada ponto medido, e que no trabalho desta dissertação, para o modelo log-distância misto, foi utilizada

uma análise média, em um método ponto-área, a obtenção de um erro médio de 0,2dB com um desvio padrão de 9,1dB é um bom resultado.

No artigo de Allsebrook & Parsons [22], houve o levantamento da propagação em três cidades britânicas, Birmingham, Bath e Bradford, nas frequências de 85,875MHz, 167,2MHz e 441,025MHz, respectivamente. Para o caso da frequência de 441MHz, que mais se aproxima dos 635MHz utilizados neste trabalho, foi utilizado um transmissor de teste com 3,8W, onde foram coletadas amostras em 300 setores com aproximadamente 8000 medidas cada, numa extensão de 10km. Utilizando o seu próprio método, obtiveram-se um erro médio de 0,8dB, 3,6dB e 5,5dB com um desvio padrão de 8,0dB, 7,9dB e 10,7dB, respectivamente.

No trabalho de Rao, Prasad *et al* [23], foram monitoradas as transmissões de radiodifusão de televisão nas cidades da Índia, Sullurpet, Sriharikota e Renigunta, em distâncias até 10km, nas frequências de 368,15MHz, 385,15MHz e 468,00MHz, respectivamente, utilizando transmissores com potência de 10W. Utilizando o método de Hata obteve um desvio padrão de 5,4dB para regiões rurais, e utilizando outros métodos específicos do local, por exemplo, método de Egli e Walfisch-Ikegami, obteve um desvio padrão entre 6,0dB e 7,7dB. Okumura, *apud* Rao, sugere um desvio padrão de 5,8dB para a faixa de 400MHz.

Um outro modo de comparar os resultados é pelo índice de propagação n . No artigo de Prasad [24], foi feito um levantamento em diversas cidades da Índia, nas faixas de frequências de VHF e UHF, mas utilizando a análise segundo o modelo de Perez-Vega e Zamanillo, descrito na seção 3.5, que avalia o índice de propagação n em função da distância e da altura da antena transmissora, conforme (23). Dos dezoito casos analisados no artigo, o caso da cidade de Karjat onde a antena transmissora estava a 60m de altura, valor mais próximo da altura de 90m utilizada no estudo desta dissertação, o valor de n variou, aproximadamente, de 2,7 a 2,9 a partir de aproximadamente 12km. No caso analisado no trabalho desta dissertação, o valor de n para o terceiro segmento do modelo misto, a partir de 19km, foi de 2,90, demonstrando assim valores similares.

Uma avaliação do modelo da recomendação ITU-R P.1546 foi feito por Ostlin *et al* [25] em um levantamento na zona rural da Austrália. Foi monitorado o sinal de piloto de várias estações radiobase do sistema CDMA, operando na frequência de 881,52MHz. Foram coletadas medidas em trechos até 28km, com um trajeto total de aproximadamente 400km em 19 rotas. Na aplicação do método das versões 1, 2 e 3 da recomendação ITU-R P.1546, foram obtidos os erros médios de -0,26dB, -1,23dB e 11,11dB com os desvios padrão médios de

9,39dB, 10,20dB e 8,71dB, respectivamente. No artigo foram utilizadas todas as possibilidades de variantes e correções, pois a meta era avaliar as diferenças das versões da recomendação, diferente do trabalho desta dissertação que analisou, basicamente, os resultados para as variações da altura efetiva da antena transmissora, especialmente com valores médios, obtendo, conseqüentemente, um erro médio maior e também um desvio padrão maior.

O trabalho de Erceg *et al* [26], avaliou 95 macrocélulas, em diversas cidades do EUA, transmitindo na frequência de 1,9GHz, em distâncias de 0,1 a 8km, com altura de antenas transmissoras entre 10 a 80m de altura, em três diferentes categorias de terreno. Utilizando um método próprio baseado no método log-distância, obtiveram o desvio padrão em uma faixa de 5 a 16dB. Este é um resultado similar ao encontrado no trabalho desta dissertação.

Outras conclusões foram obtidas no artigo de Seidel *et al* [27], que analisaram seis casos em quatro cidades da Alemanha, transmitindo pulsos de 50W na frequência de 942,225MHz e medindo os sinais recebidos até 10km. Além do atraso do sinal, foi analisada a perda por atenuação utilizando o método de log-distância. No caso de Frankfurt (*Bank Building*), com a altura da antena em 93m, foi obtido um $n=2,4$ e um desvio padrão de 13,1dB, bastante próximo do obtido no trabalho desta dissertação. Outra conclusão obtida foi que o ponto de referência d_0 escolhido pode modificar o índice de propagação encontrado e conseqüentemente as estimativas obtidas para cada condição, pois no caso do artigo, considerando todas as medidas, com $d_0=100m$ foi obtido um $n=2,7$ para um desvio padrão de 11,8dB e com $d_0=1km$ foi obtido um $n=3,0$ para um desvio padrão de 8,9dB.

A comparação realizada nesta seção demonstrou que os modelos e técnicas utilizadas no trabalho desta dissertação estão alinhados com o que diversos pesquisadores têm estudado em relação à modelagem do canal de radiofrequência, obtendo resultados equivalentes, apesar do detalhamento diferente de cada caso.

6.3 CONCLUSÕES

A estimativa da atenuação por propagação é complexa devido à grande quantidade de variáveis envolvidas, como as condições ambientais, as condições do terreno ao longo do percurso da propagação e os obstáculos da aglomeração urbana no contorno do receptor. Como o levantamento na cidade de Curitiba apresentou desde áreas urbanas densamente habitadas até áreas rurais, e com diversas situações topográficas, isto dificultou a aplicação de um único modelo de propagação. Neste trabalho optou-se pela utilização de métodos ponto-área, que apesar de mais gerais, tornam os cálculos mais simples quando da sua aplicação.

O método log-distância misto inovou na aplicação de regressões múltiplas para o método log-distância, na busca de encontrar o ponto ideal da distância de joelho, associando as características físicas da propagação à característica do cálculo da regressão. Adicionalmente, o método log-distância misto provou ser a união, em um único método, dos métodos de Hata para área urbana em cidades grandes e para área suburbana para a região de Curitiba.

O método log-distância misto proposto neste trabalho, obtido empiricamente, apresentou uma melhor estimativa quando comparado com outros métodos tradicionais, para toda a faixa de pontos medidos, podendo ser aplicado para a região de Curitiba.

REFERÊNCIAS

- [1] BRASIL. Decreto nº 5.820, de 29 de junho de 2006. Dispõe sobre a implantação do SBTVD-T, estabelece diretrizes para a transição do sistema de transmissão analógica para o sistema de transmissão digital do serviço de radiodifusão de sons e imagens e do serviço de retransmissão de televisão, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 30 jun. 2006.
- [2] TELECO INFORMAÇÃO E SERVIÇOS DE TELECOMUNICAÇÕES. TV Digital no Brasil - Cronograma de Implantação. 2009. Disponível em <<http://www.teleco.com.br>>.
- [3] PROAKIS, J. G., SALEHI, M. **Communication Systems Engineering**. Prentice Hall, 2nd ed., USA, 2002.
- [4] GRAHAM, A. W., KIRKMAN, N. C., PAUL, P. M. **Mobile Radio Network Design in the VHF and UHF Bands – A practical Approach**. Wiley, UK, 2007.
- [5] RAPPAPORT, T. S. **Wireless Communications – Principles & Practice**. Prentice Hall, USA, 1999.
- [6] FEUERSTEIN, M. J., BLACKARD, K. L., RAPPAPORT, T. S., SEIDEL, S. Y., XIA, H. H. Path Loss, Delay Spread, and Outage Models as Functions of Antenna Height for Microcellular System Design. **IEEE Trans. On Vehicular Technology**, vol. 43, nº 3, pp.487-498, Aug. 1994.
- [7] ISKANDER, M. F., YUN, Z. Propagation Prediction Models for Wireless Communication Systems. **IEEE Trans. On Microwave Theory and Techniques**, vol. 50, nº 3, pp.662-673, Mar. 2002.
- [8] PÉREZ-VEGA, C., ZAMANILLO, J.M. Path-loss model for broadcasting applications and outdoor communication systems in the VHF and UHF bands. **IEEE Trans. Broadcasting**, vol.46, nº 2, pp.91-96, June 2002.
- [9] ITO, Y., TAGA, T., MURAMATSU, J., SUZUKI, N. Prediction of Line-of-Sight Propagation Loss in Inter-Vehicle Communication Environments. **The 18th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'07)**, 2007.
- [10] HATA, M. Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services. **IEEE Trans. On Vehicular Technology**, vol.VT-29, nº 3, pp.317-325, Aug. 1980.
- [11] OKUMARA, Y., OHMORI, E., KAWANO, T., FUKUDA, K. Field strength and variability in UHF and VHF land-mobile radio services. **Rev. Elec. Commun. Lab.**, vol. 16, pp. 825–873, 1968.
- [12] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION - RADIOCOMMUNICATION SECTOR. Recommendation **ITU-R P.1546-3**: Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3 000 MHz. ITU-R, 2007.
- [13] ANATEL (Brasil). Anexo II da Resolução Anatel nº 398, de 7 de abril de 2005. Recomendação ITU-R P.1546-1 - Método de previsões ponto-área para serviços terrestres na faixa de frequências de 30 a 3000 MHz. **Diário Oficial da União**, Brasília, 19 abr. 2005.
- [14] FEDERAL COMMUNICATIONS COMMISSION (USA). Radio and Television Broadcast Rules 47 CFR Part 73 Section 73.333 - Engineering charts. Disponível em <<http://www.fcc.gov/mb/audio/bickel/amfmrule.html>>.

- [15] ANATEL (Brasil). Ato nº 1388, de 12 de março de 2008. **Diário Oficial da União**, Brasília, seção 1, p. 78-79, 14 mar. 2008.
- [16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15601**: Televisão digital terrestre – Sistema de transmissão. Rio de Janeiro, 2007.
- [17] AGILENT TECHNOLOGIES. Testing and Troubleshooting Digital RF Communications Transmitter Designs. **Application Note 1313** nº 5968-3578E, 2002.
- [18] AGILENT TECHNOLOGIES. Spectrum Analysis Basics. **Application Note 150** nº 5952-0292, 2006.
- [19] ANATEL (Brasil). SIGAnatel - Sistema de Informações Geográficas. 2008. Disponível em <<http://sistemas.anatel.gov.br/siganatel>>.
- [20] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15604**: Televisão digital terrestre – Receptores. Rio de Janeiro, 2007.
- [21] GOLDSMITH, A. **Wireless Communications**. Cambridge University Press, UK, 2005.
- [22] ALLSEBROOK, K., PARSONS, J. D. Mobile Radio Propagation in British Cities at Frequencies in the VHF and UHF Bands. **IEEE Trans. On Vehicular Technology**, vol. VT-26, nº 4, pp.313-323, Nov. 1977.
- [23] RAO, T. R., RAO, S. V. B., PRASAD, M.V.S.N., SAIN, M., IQBAL, A., LAKSHMI, D. R. Mobile Radio Propagation Path Loss Studies at VHF/UHF Bands in Southern India. **IEEE Trans. Broadcasting**, vol.46, nº 2, pp.158-164, Jun. 2000.
- [24] PRASAD, M. V. S. N. Path Loss Exponents Deduced From VHF & UHF Measurements Over Indian Subcontinent and Model Comparison. **IEEE Trans. Broadcasting**, vol.52, nº 3, pp.290-298, Sep. 2006.
- [25] ÖSTLIN, E., SUZUKI, H., ZEPERNICK, H. J. Evaluation of the Propagation Model Recommendation ITU-R P.1546 for Mobile Services in Rural Australia. **IEEE Trans. On Vehicular Technology**, vol. 57, nº 1, pp.38-51, Jan. 2008.
- [26] ERCEG, V., GREENSTEIN, L. J., TJANDRA, S. Y., PARKOFF, S. R., GUPTA, A., KULIC, B., JULIUS, A. A., BIANCHI, R. An Empirically Based Path Loss Model for Wireless Channels in Suburban Environments. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, vol. 17, nº 7, pp.1205-1211, Jul. 1999.
- [27] SEIDEL, S. Y., RAPPAPORT, T. S., JAIN, S., LORD, M. L., SINGH, R. Path Loss, Scattering, and Multipath Delay Statistics in Four European Cities for Digital Cellular and Microcellular Radiotelephone. **IEEE Trans. On Vehicular Technology**, vol. 40, nº 4, pp.721-730, Nov. 1991.

RESUMO:

O modelamento do canal é de crucial importância na determinação da atenuação por propagação dos sinais de radiofrequência emitidos por um transmissor. Este trabalho trata da determinação de um modelo de canal a partir da análise de medidas do nível de recepção de sinais emitidos por um transmissor de TV Digital operando na faixa de UHF, em levantamento realizado na região de Curitiba. A partir da comparação de alguns modelos de propagação referenciados na literatura, foi possível ajustar o modelo log-distância para o comportamento da propagação observada no conjunto de medidas obtidos em campo, e então propor um modelo empírico de propagação que poderá ser utilizado na determinação da cobertura dos sinais de TV Digital na região de Curitiba.

PALAVRAS-CHAVE

Telecomunicações, Televisão Digital, Modelo de Propagação, Modelo log-distância, Curitiba.

ÁREA/SUB-ÁREA DE CONHECIMENTO

3.00.00.00-9 Engenharia
3.04.06.00-5 Telecomunicações

2009

Nº: 507