

Aplicação de modelos de Predição de Propagação a Redes de Computadores Sem Fio

Ewerton Romulo Silva Castro

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Eletromagnetismo Aplicado

Marcos A. Barbosa de Melo, Dr., UFCG

Orientador

Glauco Fontgalland, Dr., UFCG

Orientador

Campina Grande, Paraíba, Brasil

©Ewerton Romulo Silva Castro, Março de 2006

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

C355a Castro, Ewerton Rômulo Silva
2006 Aplicação de modelos de propagação a redes de computadores sem fio /
Ewerton Rômulo Silva Castro. — Campina Grande, 2006.
198f. : il.

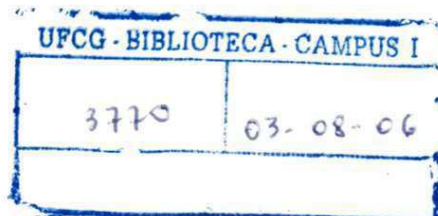
Referências.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de
Campina Grande, Centro de Engenharia e Informática.

Orientadores: Prof. Dr. Marcos Barbosa de Melo e Prof. Dr. Glauco
Fontgalland.

1— Enlace de Dados 2— Perdas de Propagação 3— WLAM 4— Ambiente
Urbano I— Título

CDU 621.371.31



**APLICAÇÃO DE MODELOS DE PREDIÇÃO DE PROPAGAÇÃO A
REDES DE COMPUTADORES SEM FIO**

EWERTON RÔMULO SILVA CASTRO

Dissertação Aprovada em 11.05.2006



MARCOS ANTONIO BARBOSA DE MELO, Dr., UFCG
Orientador



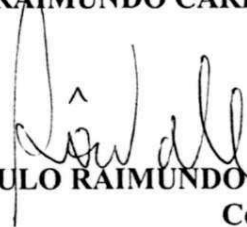
GLAUCO FONTGALLAND, Dr., UFCG
Orientador



ALFREDO GOMES NETO, D.Sc., CEFET-PB
Componente da Banca



RAIMUNDO CARLOS SILVÉRIO FREIRE, Dr., UFCG
Orientador



RÔMULO RAIMUNDO MARANHÃO DO VALLE, Mestre, UFCG
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PB
MAIO - 2006

Dedicatória

Dedico este trabalho a meus pais, Romualdo e Jadilene, aos meus irmãos, Raudek Wolney e João Neto, e aos meus avós, João e Palmira, que sempre me apoiaram e incentivaram para concluir esta etapa de minha vida.

Agradecimentos

- À Deus;
- Aos meus pais, Romualdo e Jadilene, aos meu irmãos, Raudek Wolney e João Neto, e aos meus avós, João e Palmira, pelo apoio para concluir esse trabalho;
- Aos professores Marcos A. Barbosa e Glauco Fontgalland, pela orientação, paciência e pela amizade;
- Aos professores Rômulo R. Maranhão Valle, Marcelo S. Alencar, José Ewerton P. Farias e Iguatemi, pelas valiosas contribuições ao longo deste trabalho e pela amizade;
- Aos alunos de pós-graduação Fabricio Braga e Rex Medeiros ;
- Aos colegas de pós-graduação Danilo, Edvaldo, Luiz Felipe, Luiz Gonzaga, Manoel Jacinto, Manoel Alves, Portela e Tomás, por suas contribuições e sobretudo pela companhia e amizade;
- Aos funcionários Eleonora, Galba, Pedro e Ronaldo, do DEE, pela presteza e amizade;
- Ao funcionário Antonio de Pádua Gelenske Braga, da ADENE, pela presteza e contribuição;
- À LSNET e seus funcionários, Einstein Alencar e Fernanda Almeida, pela amizade, paciência e alegria nos momentos difíceis;
- À CAPES, que financiou este trabalho.

Resumo

Neste trabalho é apresentada uma aplicação dos modelos de predição das perdas de propagação a rede de computadores sem fio, funcionando em um ambiente urbano. São utilizados equipamentos de redes sem fio no padrão 802.11b adaptado para um funcionamento em ambiente externo e urbano. Para isso, as antenas dos equipamentos são substituídas por antenas externas, instaladas nos topos das edificações, conectadas por cabos e conectores apropriados ao equipamento de medição.

Os níveis de sinal recebido são medidos levando em consideração os parâmetros altura das antenas e as distâncias em relação ao transmissor. Esses parâmetros são adicionados às equações de perdas de propagação, gerando gráficos para a situação descrita. Por fim, os dados de potência versus distância são adicionados nos gráficos gerados e comparados com os resultados obtidos.

Na parte final são analisados os resultados indicando-se quais modelos são bons na descrição do comportamento das perdas para a situação avaliada aqui.

Abstract

In this analyze is showed the prediction models for propagation loss for a wireless computer network, working in urban area. Using a 802.11b wireless equipments adapted for a function in an outdoor urban environments. For this, standard equipments antennas are changed for external antennas installed in the user edification rooftop connected by appropriate cable and connectors.

Then, power signal level received, user antenna height and distance between clients and base station was measured. These parameters are used in propagations lost equations and then graphics are plotted for described situation. At last, the data information's and graphics are plotted together in a power versus distance graphic to compare results.

At last, results are analysed to show which models are good for comportamental description for power lost with distance for the situation decribed here.

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Motivação	2
1.2	Objetivos do trabalho	3
1.3	Organização da dissertação	3
2	Rede de Telefonia Celular e Rede de Computadores sem fio	5
2.1	Rede de Telefonia Celular	5
2.2	Rede de Computadores sem fio	8
2.3	Comparando as duas redes	11
3	Modelos de Propagação	15
3.1	Modelo de Okumura-Hata	15
3.2	Modelo do CCIR	18
3.3	Modelo de Hata-Estendido	19
3.4	Okumura-Hata modificado	20
3.5	Modelo de Walfisch-Bertoni	22
3.6	Modelo Walfish-Ikegami (COST 231)	26
3.7	Modelo Maciel-Bertoni-Xia	31
3.8	Modelo simplificado Xia	35
3.8.1	A antena da ERB numa altura próxima ao nível médio das edificações.	38
3.8.2	A antena da ERB bem acima do nível médio das edificações.	38
3.8.3	A antena da ERB abaixo do nível médio das edificações.	38
3.9	Modelo de Bertoni adaptado	39
3.10	Modelo de Crosby	41
3.11	Modelo de Kitao e Ichitsubo	42
3.12	Modelo de Ibrahim - Parsons	43
3.13	Modelo de Dois Raios e a 1ª Zona de Fresnel	44
3.14	Modelo de Egli	49

3.15	Modelo de Blomquist-Ladell	49
3.16	Modelo de Lee	50
4	Ajustes para Medições	55
4.1	Sistema de referência	55
4.1.1	O transmissor e sua antena	55
4.1.2	Antena receptora, cabo de conexão e analisador de espectro	56
4.1.3	Aquisição dos dados	57
4.2	Sistema proposto para uso externo	59
5	Medições Realizadas	66
5.1	Medidas externas em ambiente urbano	66
5.2	Medidas dos enlaces de dados entre cidades	76
5.2.1	Enlace Esperança - Areial	76
5.2.2	Enlace repetidora Esperança - repetidora Areia	77
5.2.3	Enlace ERB Campina Grande - Repetidora Lagoa Seca	81
6	Analisando os Resultados	84
6.1	Analisando os Resultados - Ponto-Multiponto	84
6.1.1	Comparação com o Modelo de Okumura-Hata	90
6.1.2	Comparação com o Modelo do CCIR	92
6.1.3	Comparação com o Modelo de Hata-Estendido	97
6.1.4	Comparação com o Okumura-Hata modificado	97
6.1.5	Comparação com o Modelo de Walfisch-Bertoni	100
6.1.6	Comparação com o Modelo Walfish-Ikegami (COST 231)	102
6.1.7	Comparação com o Modelo Maciel-Bertoni-Xia	106
6.1.8	Comparação com o Modelo simplificado Xia	110
6.1.9	Comparação com o Modelo de Bertoni adaptado	113
6.1.10	Comparação com o Modelo de Crosby	115
6.1.11	Comparação com o Modelo de Kitao e Ichitsubo	116
6.1.12	Comparação com o Modelo de Ibrahim - Parsons	119
6.2	Analisando os Resultados - Ponto-a-Ponto	119
6.2.1	Enlace ERB Esperança - ERB Areial	121
6.2.2	Enlace Repetidora Esperança - Repetidora Areia	135
6.2.3	Enlace ERB Campina Grande - Repetidora Lagoa Seca	144

7 Conclusões	154
7.1 Propostas de trabalhos futuros	157
A Espectro de frequência dos canais da rede sem fio (2 à 11)	159
B Níveis de potência para os canais 2 a 11	170
C Continuação dos dados coletados nos usuários	180
D Anexo - Cartas Topográficas	184
E Dados convertidos dos demais usuários da Tabela 6.2	188
F Perfil do terreno dos enlaces entre as cidades	194
G Anexo - Gráfico para obtenção do valor de H/R	198
Bibliografia	200

Lista de Símbolos e Abreviaturas

ADENE – Agencia Desenvolvimento do Nordeste

ADSL – Asymetric Digital Subscriber Line

ANATEL – Agencia Nacional de Telecomunicações

AMPS – Advanced Mobile Phone Service

AP – Access Point

BPSK – Binary Phase Shift Keying

BSS – Basic Service set

ESS – Extended Service Set

CCIR – Consultative Committee for International Radio

CCC – Centro de Comutação e Controle

CCK – Complementary Code Keying

CDMA – Code Division Multiplex Access

COFDM – Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing

COST – Cooperation in Field of Scientific and Technical

CSMA – Carrier Sense Multiple Access

CSMA/CD – Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection

CSMA/CA – Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance

DSL – Digital Subscriber Lines

DSSS – Direct Sequence Spread Spectrum

ERB – Estação Radiobase

EM – Estação Móvel

ETACS – Extended Total Access Communication System

JTACS – Japan Total Access Communication System

FCC – Federal Communication Commission

FDMA – Frequency Division Multiplex Access

FHSS – Frequency Hopping Spread Spectrum

GSM – Global System for Mobile Communications

GPS – Global Position System

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IS-54 – Interium Standard 54

IS-95 – Interium Standard 95

ISO – International Standard Organization

ISM – Industrial,Scientific and Medical

ITU-R – International Telecommunication Union - Radiocommunication Sector

JDC – Japan Digital Cellular

LAN – Local Area Network

LSNET – Provedor de Acesso a Internet Via Radio - LSNET

LEMA – Laboratório de Eletromagnetismo e Microondas Aplicados

LLC – Logical Link Control

LOS – Line of Sight

NADC – North American Digital Cellular

NAMPS – Narrowband Advanced Mobile Phone System

NTACS – Narrowband Total Access Communication System

NLOS – Non Line of Sight

MAC – Medium Access Control

NIC – Network Interface Card

OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing

OSI – Open Systems Interconnection

PCS – Personal Communication Services

QoS – Quality of Service

QPSK – Quadrature Phase Shift Keying

SNR – Relação Sinal-Ruído

TDMA – Time Division Multiplex Access

UHF – Ultra High Frequency

VHF – Very High Frequency

WECA – Wireless Ethernet Compatibility Alliance

Wi-fi – Wireless Fidelity

WLAN – Wireless Local Area Network

xDSL – família de tecnologias DSL

Lista de Tabelas

2.1	Padrões de Telefonia Celular Analógica de alguns países (ALENCAR, 1998b) . . .	6
2.2	Padrões de Telefonia Celular Digital de alguns países (ALENCAR, 1998b)	7
3.1	Condições padrão e fatores de correção (* parâmetros da nova condição)	50
4.1	Características da antena receptora (ROHDE, 2005)	58
4.2	Características do cartão PCMCIA (PROXIM, 2006)	62
5.1	Dados gerais das cidades onde foram realizadas as medições. (IBGE, 2005) . . .	67
5.2	Características da antena omni direcional	68
5.3	Dados obtidos no local da ERB (Esperança)	73
5.4	Características da antena com refletor tipo grade utilizado nas medições nos clientes	74
5.5	Dados coletados nos usuários de 1 a 4. Demais Tabelas no anexo C.	75
5.6	Dados obtidos na ERB (Areial)	77
5.7	Características da antena omnidirecional	79
5.8	Dados obtidos na Repetidora Areia	80
5.9	Dados obtidos na Repetidora Esperança	80
5.10	Características da antena painel	81
5.11	Dados obtidos em repetidora Lagoa Seca	83
5.12	Dados obtidos na ERB em Campina Grande	83
6.1	Dados obtidos para a ERB (Esperança)	86
6.2	Dados convertidos dos usuários - Dados complementares no Anexo E.	87
6.3	Composição do valor de G_t	89
6.4	Dados obtidos para a ERB (Esperança)	121
6.5	Dados obtidos na ERB (Areial)	122
6.6	Dados topográficos obtidos no enlace ERB Esperança - ERB Areial	123
6.7	Composição do valor de G_t para o enlace Esp-Areial	124
6.8	Condições padrão e fatores de correção (* parâmetros da nova condição)	130
6.9	Resultados obtidos no enlace ERB Esperança - ERB Areial	131

6.10	Dados obtidos na repetidora Esperança	132
6.11	Dados obtidos na repetidora Areia	133
6.12	Composição do valor de G_t para o enlace repetidora Esperança - repetidora Areia	134
6.13	Condições padrão e fatores de correção (* parâmetros da nova condição)	140
6.14	Resultados obtidos no enlace repetidora Esperança - repetidora Areia	141
6.15	Dados obtidos na ERB em Campina Grande	142
6.16	Dados obtidos na ERB (Areial)	143
6.17	Dados topográficos obtidos no enlace ERB Campina Grande - repetidora Lagoa Seca	144
6.18	Composição do valor de G_t para o enlace Campina Grande - Lagoa Seca	145
6.19	Condições padrão e fatores de correção (* parâmetros da nova condição)	149
6.20	Resultados obtidos no enlace ERB Campina Grande - repetidora Lagoa Seca	153
C.1	Dados coletados - continuação	180
C.2	Dados coletados - continuação	181
C.3	Dados coletados - continuação	182
C.4	Dados coletados - continuação	183
E.1	Dados convertidos dos demais usuários	188
E.2	Dados convertidos dos demais usuários	189
E.3	Dados convertidos dos demais usuários	190
E.4	Dados convertidos dos demais usuários	191
E.5	Dados convertidos dos demais usuários	192
E.6	Dados convertidos dos demais usuários	193

Lista de Figuras

2.1	Distância de reuso para um cluster de: (a) 4 células e (b) 7 células	7
2.2	O padrão 802.11 e o Modelo ISO/OSI	9
2.3	Modo de operação: Infra-Estrutura	10
2.4	Modo de operação: <i>Ad-Hoc</i>	11
2.5	Canais utilizados na telefonia móvel celular analógica exibidos separadamente para comunicação: (a) Sentido Celular => ERB e (b) Sentido ERB => Celular	12
2.6	Detalhamento dos canais do sistema AMPS, onde em (a) temos as bandas A e B lado a lado, explicitando os canais de voz e de controle para cada banda e em (b) se observa os canais de comunicações de entrada e saída da ERB	13
2.7	Utilização do canal no sistema wireless	14
3.1	Modelo de Walfisch-Bertoni (WALFISCH; BERTONI, 1988)	22
3.2	Modelo de Walfisch-Bertoni na situação deste trabalho	23
3.3	Modelo de Walfisch-Ikegami e seus parâmetros (IKEGAMI; YOSHIDA, 1980)	27
3.4	Perdas por orientação (IKEGAMI; YOSHIDA, 1980)	29
3.5	Modelo de Maciel-Bertoni-Xia (XIA; BERTONI, 1992)	32
3.6	Modelo de Maciel-Bertoni-Xia - Estação Rádio Base acima do nível das edificações (CAVALCANTE, 1999)	33
3.7	Modelo de Maciel-Bertoni-Xia - Estação Rádio Base abaixo do nível das edificações (CAVALCANTE, 1999)	33
3.8	Modelo de Maciel-Bertoni-Xia - Geometria para o calculo de L_{e1} (CAVALCANTE, 1999)	34
3.9	Modelo de dois raios	45
3.10	Região do Elipsóide de Fresnel	46
3.11	Situações de Folga e Obstrução da 1ª Zona de Fresnel	47
3.12	Variações do parâmetro H	47
3.13	Calculo do raio do obstáculo	49
3.14	Parâmetros do modelo de Lee	52

3.15	Parâmetros do modelo de Lee	53
4.1	Montagem do sistema de referência	56
4.2	Antena Receptora e o suporte utilizados (ROHDE, 2005)	58
4.3	Analizador de espectro R&S FSH3 (ROHDE, 2005)	59
4.4	Tela capturada pelo FSH View - Espectro de Frequência para o canal 1 (2412 MHz)	60
4.5	Processo de sobreposição para obtenção das curvas mostradas pelo analisador de espectro	61
4.6	Espalhamento do sinal no tempo	61
4.7	Montagem do sistema proposto para medidas externas	63
4.8	Resultado obtido utilizando a montagem do sistema proposto para o canal 1 (2412 MHz)	63
5.1	Infra-estrutura para distribuição em ambiente urbano	67
5.2	Antena Omni Direcional utilizada na ERB e seu diagrama de irradiação	69
5.3	Cabo RGC 213 utilizado na ERB e nas conexões das antenas clientes. Possui perda de 25,2dB/100m na faixa de frequência de 2400 - 2500 MHz	69
5.4	Ponto de acesso AP-2000 (PROXIM, 2006)	69
5.5	Conectores RJ 45 e cabo do tipo par trançado utilizados para conectar a ERB ao servidor principal	70
5.6	Vista aérea nas direções a partir da ERB em Esperança (Leste)	70
5.7	Vista aérea nas direções a partir da ERB em Esperança (Oeste)	71
5.8	Vista aérea nas direções a partir da ERB em Esperança (Sul)	71
5.9	Vista aérea nas direções a partir da ERB em Esperança (Norte)	72
5.10	GPS Garmin utilizado nas medidas	72
5.11	Equipamentos utilizados nas medições em cada cliente	74
5.12	Enlace Esperança - Areial - Equipamentos utilizados nas medições	77
5.13	Enlace Esperança - Areia - Equipamentos utilizados nas medições	78
5.14	Amplificador de 1 Watt utilizado no enlace. À esquerda vê-se o dispositivo alimentador. À direita encontra-se a unidade amplificadora	79
5.15	Enlace ERB Campina Grande - Repetidora Lagoa Seca - Equipamentos utilizados nas medições	82
5.16	Antena tipo painel	82
6.1	Coordenadas Esféricas e Coordenadas Geográficas	85

6.2	Nível de Sinal x Distância - Obtidos nas medições dos vinte usuários na cidade de Esperança	88
6.3	Curvas obtidas no Modelo de Okumura-Hata	91
6.4	Curvas obtidas no Modelo do CCIR para $B_1 = 5\%$	93
6.5	Curvas obtidas no Modelo do CCIR para $B_1 = 10\%$	94
6.6	Curvas obtidas no Modelo do CCIR para $B_1 = 15\%$	95
6.7	Curvas obtidas no Modelo do CCIR para $B_1 = 20\%$	96
6.8	Curvas obtidas no Modelo de Hata Estendido	98
6.9	Curvas obtidas no Modelo de Hata Modificado	101
6.10	Curvas obtidas no Modelo de Walfisch-Bertoni	103
6.11	Curvas obtidas no Modelo de COST 231 em LOS	105
6.12	Curvas obtidas no Modelo de COST 231 em NLOS	106
6.13	Curvas obtidas no Modelo de Marciel-Bertoni-Xia $h_m = 3m$	108
6.14	Curvas obtidas no Modelo de Marciel-Bertoni-Xia	109
6.15	Curvas obtidas no Modelo simplificado de Xia p/ $d = 5m$	111
6.16	Curvas obtidas no Modelo simplificado de Xia p/ $d = 10m$	112
6.17	Curvas obtidas no Modelo de Bertoni adaptado	114
6.18	Curvas obtidas no Modelo de Crosby	116
6.19	Curvas obtidas no Modelo de Kitao-Ichitsubo	117
6.20	Curvas obtidas no Modelo de Kitao-Ichitsubo c/ $w = 5$ e $10 m$ e $\phi = 0$	118
6.21	Curvas obtidas no Modelo de Ibrahim-Parsons	120
6.22	Raio da 1ª Zona de Fresnel em função da frequência para o ponto crítico do enlace Esperança - Areial	126
6.23	Resultados para o Modelo de Egli no enlace Esperança - Areial	128
6.24	Resultados para o Modelo de Blomquist-Ladell no enlace Esperança - Areial	129
6.25	Raio da 1ª Zona de Fresnel em função da frequência para o ponto crítico do enlace Esperança - Areia	136
6.26	Resultados obtidos no enlace Esperança - Areia para o Modelo de Egli	138
6.27	Resultados obtidos no enlace Esperança - Areia para o Modelo de Blomquist-Ladell	139
6.28	Raio da 1ª Zona de Fresnel em função da frequência para o ponto crítico do enlace Campina Grande - Lagoa Seca	147
6.29	Resultados obtidos para o modelo de Egli no enlace Campina Grande - Lagoa Seca	149
6.30	Resultados obtidos para o modelo de Blomquist-Ladell no enlace Campina Grande - Lagoa Seca sem perdas por difração	150

6.31	Resultados obtidos para o modelo de Blomquist-Ladell no enlace Campina Grande - Lagoa Seca com perdas por difração	151
A.1	Tela capturada pelo FSH View - Espectro de Freqüência para o canal 2 (2417 MHz)	160
A.2	Tela capturada pelo FSH View - Espectro de Freqüência para o canal 3 (2422 MHz)	161
A.3	Tela capturada pelo FSH View - Espectro de Freqüência para o canal 4 (2427 MHz)	162
A.4	Tela capturada pelo FSH View - Espectro de Freqüência para o canal 5 (2432 MHz)	163
A.5	Tela capturada pelo FSH View - Espectro de Freqüência para o canal 6 (2437 MHz)	164
A.6	Tela capturada pelo FSH View - Espectro de Freqüência para o canal 7 (2442 MHz)	165
A.7	Tela capturada pelo FSH View - Espectro de Freqüência para o canal 8 (2447 MHz)	166
A.8	Tela capturada pelo FSH View - Espectro de Freqüência para o canal 9 (2452 MHz)	167
A.9	Tela capturada pelo FSH View - Espectro de Freqüência para o canal 10 (2457 MHz)	168
A.10	Tela capturada pelo FSH View - Espectro de Freqüência para o canal 11 (2462 MHz)	169
B.1	Resultado obtido utilizando a montagem do sistema proposto para o canal 2 (2417 MHz)	170
B.2	Resultado obtido utilizando a montagem do sistema proposto para o canal 3 (2422 MHz)	171
B.3	Resultado obtido utilizando a montagem do sistema proposto para o canal 4 (2427 MHz)	172
B.4	Resultado obtido utilizando a montagem do sistema proposto para o canal 5 (2432 MHz)	173
B.5	Resultado obtido utilizando a montagem do sistema proposto para o canal 6 (2437 MHz)	174
B.6	Resultado obtido utilizando a montagem do sistema proposto para o canal 7 (2442 MHz)	175

B.7	Resultado obtido utilizando a montagem do sistema proposto para o canal 8 (2447 MHz)	176
B.8	Resultado obtido utilizando a montagem do sistema proposto para o canal 9 (2452 MHz)	177
B.9	Resultado obtido utilizando a montagem do sistema proposto para o canal 10 (2457 MHz)	178
B.10	Resultado obtido utilizando a montagem do sistema proposto para o canal 11 (2462 MHz)	179
D.1	Parte da carta topográfica SB.25-Y-C-I MI-1212 , região do enlace Esperança - Areial	185
D.2	Parte da carta topográfica SB.25-Y-C-I MI-1212 , região do enlace Repetidora Esperança - Repetidora Areia	186
D.3	Parte da carta topográfica SB.25-Y-C-I MI-1212 , região do enlace Campina Grande - Lagoa Seca	187
F.1	Perfil do terreno ERB Esperança - ERB Areial	195
F.2	Perfil do terreno repetidora Esperança - repetidora Areia	196
F.3	Perfil do terreno ERB Campina Grande - repetidora Lagoa Seca	197
G.1	Gráfico para obtenção do valor de H/R em função α	199

Capítulo 1

Introdução

No mundo moderno, a Internet consolidou-se como ferramenta indispensável na atividade de pesquisa e baseia-se na rapidez da informação e na quantidade disponível de dados. O crescimento do envio e recebimento de informações justifica-se pela ampla utilização em compras virtuais, transações em bancárias e comerciais. Com dados de 2004 a referência (FEBRABAN, 2005) comprovou que o número de transações em bancos "on line" cresceu 58,6% em relação a 2003. O aumento das compras virtuais se justifica pelo maior avanço verificado no uso cartões de débito em pontos-de-venda no comércio: 72,4% (FEBRABAN, 2005). Muitas outras aplicações fazem com que haja um crescimento acentuado da Internet e bem como no tempo de sua utilização, segundo levantamento que analisou o acesso residencial de usuários de vários países em 84 subcategorias de páginas da Internet (IBOPE, 2005). Este levantamento mostrou ainda que o Brasil apresenta uma das maiores concentrações de uso.

Como é natural no ser humano, quanto maior o tempo de utilização de uma ferramenta menor será o interesse e a paciência no acesso as informações. Por consequência teremos desestímulo e a não conclusão da pesquisa. Esse fator, em Telecomunicações, traduz-se em uma necessidade de maior largura de banda para o fluxo de dados, maior velocidade, e conseqüentemente um menor tempo no acesso das informações.

O aumento na largura de banda requer infra-estrutura adequada para esta mudança. Nesse aspecto, o Brasil enfrenta grandes problemas pelos altos e baixos ocorridos na história de suas telecomunicações (ALENCAR, 1998b). No entanto, com a criação da ANATEL (ANATEL, 2006a)(órgão regulador das telecomunicações do Brasil), e com as políticas de "metas" bem definidas pelo órgão regulador e fiscalizações das empresas prestadoras de serviços, está havendo uma grande oferta de acesso à Internet em banda larga e a baixo custo (PIRAMID, 2005).

Mesmo com essas mudanças, a oferta de acesso à banda larga ainda está restrita aos grandes centros urbanos, utilizando principalmente a tecnologia ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber*

Line) (ALENCAR, 1998b). É o caso da Telefônica (Speedy) (SPEEDY, 2005), da Brasil Telecom (BrTurbo) (BRTURBO, 2005) e da Telemar (Velox) (VELOX, 2005), apesar da existência de outras tecnologias com menor participação no mercado (PIRAMID, 2005).

Embora existam alternativas para localidades remotas como conexão via satélite (STARONE, 2005) ou conexões dedicadas, ("TC IP CONNECT" (TELEMAR, 2005) e "Business Link" (EMBRATEL, 2005)), os custos são muito elevados, restringindo o acesso a órgãos públicos e habitantes de alto poder aquisitivo. Assim, os usuários que desejem utilizar a Internet nestas localidades dispõem apenas da conexão discada, também chamada *dial-up* e/ou banda estreita, utilizando *modems* de 28,8 kbps, 36,6 kbps e 56 kbps e com custo de ligação interurbana. Isso porque as cidades pequenas não dispõem de qualquer tipo de provedor de acesso, sendo necessária a ligação telefônica, cobrada por pulso, entre a origem e a cidade de destino que possua provedor de acesso a Internet (na maioria dos casos, localizados nos grandes centros urbanos).

Pesquisas realizadas recentemente comprovam esta restrição no que diz respeito à "*inclusão digital*". Os resultados mostram que 17,5% dos domicílios possuem computador, mas destes apenas 13,2% possuem acesso à Internet (Brasil). Nas Regiões Norte e Nordeste, estes percentuais são bem inferiores (5,1% e 6,0%, respectivamente) (IBGE, 2005). Essa média está abaixo da média mundial ou principalmente dos EUA e Comunidade Européia. Para a Paraíba, os resultados indicam que 8,2% possuem computadores e 5,2% possuem acesso à Internet. Ainda não existem dados estatísticos, mas o alto custo diminui ainda mais a parcela da população das pequenas cidades do interior da Paraíba, com acesso à Internet.

1.1 Motivação

Analisando todos esses fatores, encontrou-se uma alternativa que possibilitaria a redução desta "exclusão" no acesso à Internet, principalmente, nas pequenas cidades devido aos custos reduzidos de implantação. Essa alternativa corresponde ao uso de redes sem fio de computadores, também conhecidas como rede *wireless* ou Wi-Fi (wireless fidelity), padronizado pelo IEEE como 802.11b (IEEE, 1999a), (IEEE, 1999b). Aliado ao padrão já definido, foi feito o esforço da união dos líderes da indústria "sem fio" que uniram-se para a criação da Aliança de Compatibilidade Ethernet sem fio (WECA - Wireless Ethernet Compatibility Alliance - posteriormente chamada de *Wi-Fi Alliance*) (WI-FI, 2005). O objetivo alcançado foi a certificação dos diversos produtos de rede *wireless* de diferentes fabricantes para que estes tenham interoperabilidade e compatibilidade entre si com o padrão citado. Com isso foram possíveis: uma rápida difusão, adoção das redes sem fio em diversos segmentos e níveis de aplicações e uma queda acentuada nos custos de produção e preço final ao consumidor em diversos países (WI-FI, 2005).

Nesta dissertação, é apresentado, num primeiro momento, o projeto de viabilidade do uso das redes sem fio para possibilitar o acesso à Internet às pequenas cidades em particular a cidade de Lagoa Sêca. Em seguida estabelece-se um paralelo entre a rede de telefonia celular e a rede de computadores sem fio. É analisado um pouco da estrutura física e lógica, mas dando ênfase à análise da propagação do sinal em ambientes urbanos. A partir disso, busca-se mostrar como pequenas alterações na concepção da rede sem fio podem levar a resultados equivalentes, tanto do ponto de vista prático como teórico, aos obtidos nas equações de predição da rede de telefonia celular.

1.2 Objetivos do trabalho

Este trabalho de dissertação tem como principal objetivo, a aplicação dos modelos de predição em um sistema de comunicações, sem fio (via rádio) entre uma rede de computadores em ambiente urbano e a rede Internet. O sistema deverá possibilitar pelo menos um enlace de comunicação dos sinais entre duas cidades. Nesse caso foi feita uma analogia entre a teoria da comunicação de telefonia celular e a comunicação da rede de computadores com a Internet. O padrão considerado é o IEEE 802.11b, no qual os sinais da rede de computadores sem fio foram analisados. Foi feito, um estudo dos diversos modelos de predição das perdas de propagação. A partir disso, foram analisadas as condições necessárias para sua utilização dessas predições na situação de uma rede sem fio de computadores em ambiente urbano. Foram efetuadas diversas medições de níveis de potência utilizando equipamentos instalados e em funcionamento em uma cidade de pequeno porte (Esperança). A intenção foi o de tentar verificar se o modelamento das perdas de propagação feito para telefonia celular poderia ser modificado para descrição das perdas de propagação de uma rede de computadores sem fio funcionando em um ambiente urbano.

1.3 Organização da dissertação

A organização desta dissertação tem o seguinte roteiro:

- O Capítulo 2 contém uma breve descrição da telefonia celular, da rede sem fio de computadores e uma comparação entre elas.
- No Capítulo 3 é descrito os modelos de predição das perdas de propagação.
- No Capítulo 4 é apresentado as medições realizadas em laboratório para aferição dos equipamentos.

- O Capítulo 5 contém os valores obtidos nas medições.
- No Capítulo 6 é feita a análise das informações coletadas.
- O Capítulo 7 contém as conclusões e as perspectivas de trabalhos futuros.
- No Anexo A é apresentado o espectro de frequência dos canais da rede sem fio (2 à 11).
- O Anexo B contém os níveis de potência para os canais da rede sem fio (2 à 11).
- O Anexo C contém os demais dados coletados nos usuários.
- O Anexo D é listado as Cartas Topográficas das regiões dos enlaces envolvidos neste trabalho.
- O Anexo E contém os demais dados convertidos dos usuários para análise da propagação urbana.
- No Anexo F é apresentado os perfis dos terrenos dos enlaces de dados entre as cidades.
- E por fim o Anexo G, contendo as curvas de H/R para cálculo das perdas por difração.

Capítulo 2

Rede de Telefonia Celular e Rede de Computadores sem fio

2.1 Rede de Telefonia Celular

Desde a invenção dos sistemas de rádio pelo padre Roberto Landel (ALENCAR, 1998b) e sua comercialização por Marconi (VALLE, 2000), um dos objetivos dos engenheiros de telefonia tem sido o fornecimento de serviços de telefonia pessoal (CAVALCANTE, 1999) usando sistemas via rádio para fazer o enlace entre dois pontos (telefones) fixos ou móveis em pedestres ou automóveis. As limitações tecnológicas com o espaço restrito do espectro de frequência foram uma das grandes barreiras para a viabilização dos sistemas rádio móvel. Contudo, essas limitações tecnológicas foram superadas graças ao desenvolvimento da microeletrônica, permitindo a miniaturização e incorporação de sofisticadas operações, além da implementação a um baixo custo. A limitação da faixa no espectro de frequência continuou sendo um obstáculo, mas foi astuciosamente otimizado pela técnica de reuso de frequência (CAVALCANTE, 1999). O reuso de frequência é baseado no fato que, basicamente, devido à característica de distância relativamente pequena de propagação das frequências em VHF e UHF é possível selecionar o mesmo canal para diferentes usuários situados em áreas separadas por distâncias consideráveis e com elevado grau de confiabilidade, sem que haja interferência entre eles. Esse mecanismo de reuso é a base da tecnologia celular (CAVALCANTE, 1999), (DODD, 2000), (NASCIMENTO, 2000). Na década de 80 iniciou-se a utilização comercial da rede de telefonia celular analógica, representada pelo AMPS (Advanced Mobile Phone Service), desenvolvido pelos Estados Unidos e utilizado como modelo para diversos outros sistemas em vários países. Na Tabela 2.1, podemos observar as principais características dos modelos utilizados nos sistemas celulares analógicos.

Com a popularização dos serviços de telefonia celular novos desafios começaram a surgir. O

Local	EUA	Japão	Inglaterra	Escandinávia	Alemanha
Nome do Sistema	AMPS	NTT	TACS	NMT	C-450
Freq.(MHz) ERB => EM	870-890	870-885	935-960	463-467,5	461,3-465,74
Freq.(MHz) EM => ERB	825-845	925-940	890-915	453-457,5	451,1-455,74
Separação entre Tx e Rx em MHz	45	55	45	10	10
Tamanho dos Canais (KHz)	30	25	25	25	20
Número de canais	666	600	1000	180	122
Raio de cobertura (Km)	2-20	5-10	2-20	1,8-40	5-30

Tabela 2.1: Padrões de Telefonia Celular Analógica de alguns países (ALENCAR, 1998b)

aumento do número de usuários tornou-se um dos principais problemas por causa da limitação do número de canais disponíveis. O sistema precisava equilibrar requisitos de área de cobertura e capacidade de usuários. Estes requisitos são conflitantes porque, se a estação base tem que cobrir uma área grande, ela deveria operar com potência elevada e estar situada no ponto mais alto da região de cobertura (CAVALCANTE, 1999). Mas seguir essa estratégia significa que o número de usuários atendidos por área de cobertura seria pequeno. Assim os projetistas buscaram outras estratégias que permitissem atender ao requisito de cobertura e um maior número de usuários. Para isso começou-se a utilizar várias estações base com uma infra-estrutura de rádio fixa, ou via cabo, para conectá-las a uma central de controle (CCC). Dessa forma dividiu-se as regiões de cobertura em células, cada uma possuindo um determinado número de canais. O conjunto de células que contém todos os canais é chamado de *cluster* (grupo de células). As células destacadas, na Figura 2.1, representam dois *clusters* de 4 células e 2 de 7 células. Com base no reuso de canais, cada *cluster* é repetido de maneira que uma célula esteja a uma determinada distância D da outra célula que use os mesmos canais, nos *cluster* adjacentes (ALENCAR, 1998b) (CAVALCANTE, 1999) (ALENCAR, 1998a). Para se calcular D, distância de reuso, Figura 2.1, utiliza-se a equação:

$$\frac{D}{R} = \sqrt{3N} \quad (2.1)$$

onde R é o raio da célula e

$$N = i^2 + ij + j^2 \quad (2.2)$$

é o número de células do cluster (i e j são inteiros positivos).

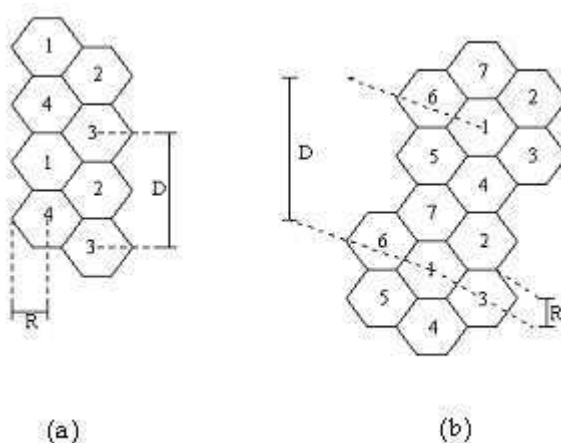


Figura 2.1: Distância de reuso para um cluster de: (a) 4 células e (b) 7 células

Mesmo com o aumento do número de células, a capacidade do sistema ainda era insuficiente para atender as necessidades, principalmente nos grandes centros urbanos. A interferência de co-canal e canal adjacente, são os problemas mais importantes das comunicações móveis e o principal elemento de limitação na rede de telefonia celular. O avanço nas comunicações digitais permitiu uma melhor eficiência espectral, maior rejeição à interferência, maior imunidade ao ambiente de propagação, utilização de códigos corretores de erros e agregação de serviços e funções ao aparelho. Estas vantagens permitiram a mudança do sistema de telefonia móvel analógica para um sistema digital, também chamado de 2G (2ª geração). Na Tabela 2.2 podemos observar as principais características dos mais importantes sistemas de telefonia celular digital usados no mundo (ALENCAR, 1998b) (ALENCAR, 1998a).

Local	Europa	EUA	EUA	Japão
Sistema	GSM	IS-54	IS-95	PDC
Freq.(MHz) ERB => EM	935-960	869-894	869-894	810-826
Freq.(MHz) EM => ERB	890-915	824-849	824-849	940-956
Tipo de Acesso	TDMA	TDMA	CDMA	TDMA
Banda Passante (kHz)	200	30	1250	25

Tabela 2.2: Padrões de Telefonia Celular Digital de alguns países (ALENCAR, 1998b)

Apesar de orientados por filosofias distintas, os sistemas possuem pontos em comum e permitiram o aumento da capacidade dos sistemas, em média, de duas vezes (ALENCAR, 1998b), (ALENCAR, 1998a) em relação ao sistema analógico. Além de permitirem a implemen-

tação de diversos serviços nos aparelhos (correio de voz, enviar e receber mensagens e e-mail, caixa postal, etc ...). Com isso a telefonia celular digital permitiu a redução dos custos e tornou-se mais acessível à população. Um resultado dessa mudança é o número de telefones celulares no Brasil, em 2004, já era maior que o número de telefones fixos (ANATEL, 2006a).

2.2 Rede de Computadores sem fio

O Instituto de Engenheiros Eletrônicos e Eletrônicos (IEEE) ratificou a especificação 802.11 em 1997, como padrão para redes de computadores sem fio. O padrão 802.11 (IEEE, 1999a) permite taxas de transmissões de 1 Mbps e 2 Mbps e indica os métodos fundamentais de sinalização e outros serviços. Rede de computadores sem fio, conhecida também como "wireless" LAN ou simplesmente WLAN, é um sistema de transmissão de dados desenvolvido para permitir a rede local de computadores utilizar ondas de rádio, em vez de uma comunicação via cabo. Em grandes empresas a rede sem fio é, geralmente, utilizada na parte final do enlace, entre a estrutura feita por cabo e o grupo de computadores clientes. Os usuários da rede sem fio tem acesso a todos os recursos disponíveis em qualquer local coberto pelo sistema (setor).

O ponto crítico que restringiu a demanda pelo WLAN foi sua taxa limitada. A taxa de transferência de dados básica suportada pelo padrão original era muito baixa para a maioria das aplicações comerciais e isso gerou pouca adesão a este tipo de rede sem fio. Reconhecendo a necessidade crítica de se aumentar as taxas de transmissão de dados suportados, o IEEE ratificou um novo padrão, 802.11b (IEEE, 1999b). Também chamado de padrão 802.11 de altas-taxas porque chega a taxas de transmissão de dados de até 11Mbps. Com essa nova taxa de transferência foi possível para os órgãos reguladores e grandes fornecedores de produtos aderirem ao novo sistema, como sendo ideal para atender grandes empresas, pequenos escritórios e ambientes residenciais. Fora do que foi padronizado, os líderes da indústria sem fio uniram-se para a criação da Aliança de Compatibilidade Ethernet Sem Fio (WECA - Wireless Ethernet Compatibility Alliance - posteriormente chamada de Wi-Fi Alliance) (WI-FI, 2005). A missão da WECA era a certificação dos diversos produtos de rede sem fio (*wireless*) de diferentes fabricantes para que eles tivessem interoperabilidade e compatibilidade com o IEEE 802.11b (IEEE, 1999b). São membros da WECA os fabricantes de semicondutores para WLAN, provedores WLAN, vendedores de computadores e produtores de software.

Como todos os outros padrões 802, o padrão 802.11 (IEEE, 1999a) teve foco nas duas primeiras camadas do modelo ISO/OSI (ISO-International Standard Organization / OSI-Open Systems Interconnection); a camada física e a camada de enlace (Enlace /dados), ver Figura 2.2. Dessa forma qualquer aplicação de rede, sistema operacional ou protocolo de rede, incluindo

TCP/IP e Rede Novell funcionaram na rede sem fio tão facilmente como funciona na rede Ethernet. Isso ocorre, pois para as camadas superiores do modelo ISO/OSI as duas primeiras camadas funcionam de maneira similar ao padrão Ethernet, uma das grandes vantagens do padrão 802.11 (IEEE, 1999a) e 802.11b (IEEE, 1999b) (WI-FI, 2005).

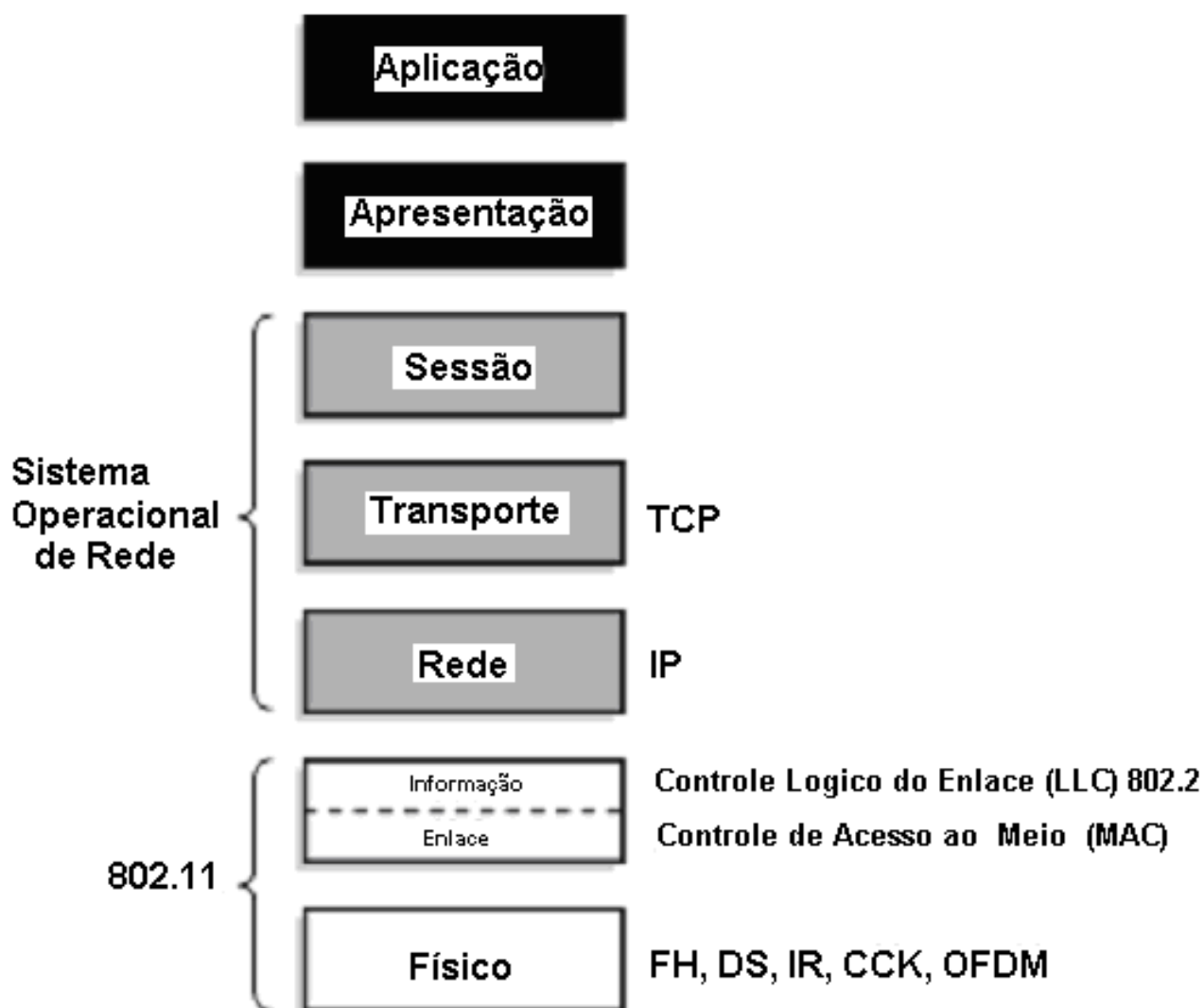


Figura 2.2: O padrão 802.11 e o Modelo ISO/OSI

A rede de computadores sem fio possui dois tipos de equipamentos: a estação sem fio, geralmente um PC equipado com uma placa de rede sem fio (wireless NIC - Network interface card), e um ponto de acesso (AP), que funciona como ponte entre a rede sem fio e a rede com fio. O ponto de acesso (Access point) é geralmente um rádio com uma interface de cabo (Ethernet 802.3) e um software que faz a ponte entre as duas interfaces. O ponto de acesso funciona como estação base da rede sem fio, permitindo acesso das diversas estações de trabalho

sem fio com a rede estruturada por cabo, veja Figura 2.3. As estações sem fio podem ser tanto computadores com placas de rede sem fio (PC card, PCI, ou ISA NIC) ou até mesmo clientes que não sejam PC's, tais como telefones baseados no 802.11 (IEEE, 1999a). As redes sem fio definem dois modos de operação: modo *infra-estrutura* e modo *Ad Hoc*. No modo *infra-estrutura* (Figura 2.3), a rede sem fio consiste de pelo menos um ponto de acesso conectado à rede estruturada por cabo permitindo o acesso das estações sem fio. Esta configuração é chamada de Conjunto Básico de Serviços (BSS - Basic Service Set). O Conjunto de Serviços Estendido (ESS - Extended Service Set) é o conjunto de dois ou mais BSS formando uma só rede. Como muitas das WLAN utilizadas precisam de serviços das redes convencionais (servidores de arquivo, Impressoras, acesso à internet) a maioria opera no modo infra-estrutura (IEEE, 1999a), (IEEE, 1999b), (WI-FI, 2005).

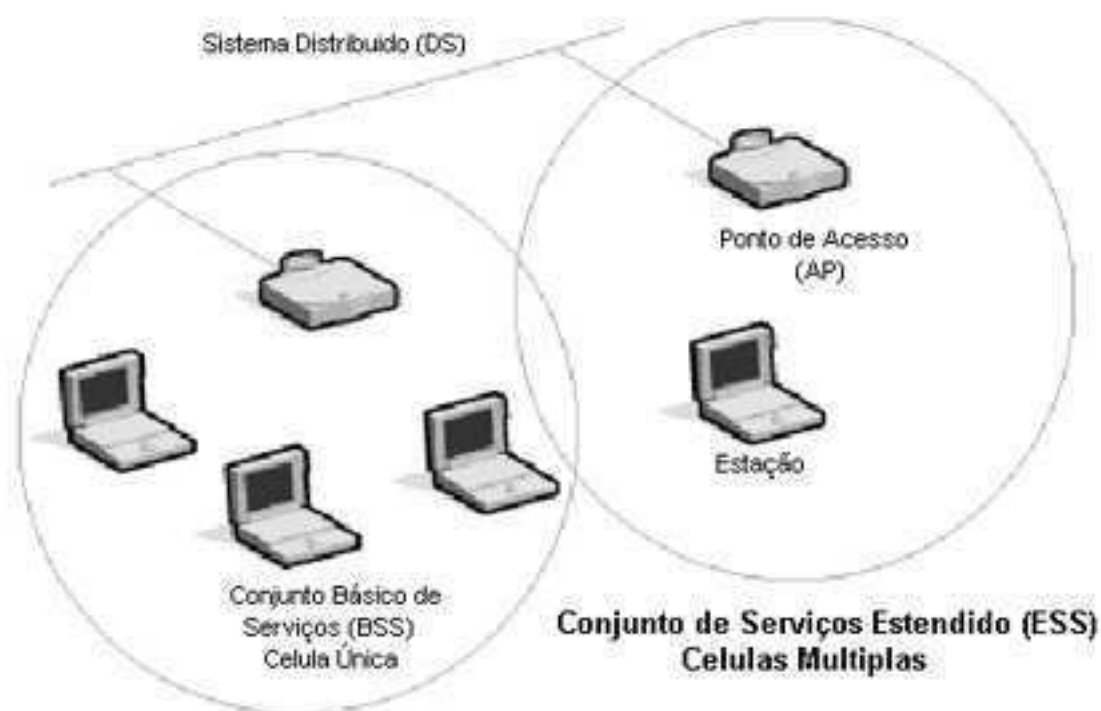


Figura 2.3: Modo de operação: Infra-Estrutura

O modo *Ad Hoc* (também chamado de ponto-a-ponto ou conjunto básico de serviços independentes, o IBSS) é simplesmente um conjunto de dispositivos 802.11b se comunicando uns com os outros de forma direta sem a necessidade de utilizar o ponto de acesso ou qualquer conexão estruturada por cabo (Figura 2.4). O modo *Ad Hoc* de operação é bastante útil para criação de uma rede sem fio rápida e temporária onde não haja necessidade da criação de um ambiente BSS como em salas de hotéis, centro de convenções e aeroportos (IEEE, 1999a) (IEEE,

1999b) (WI-FI, 2005).

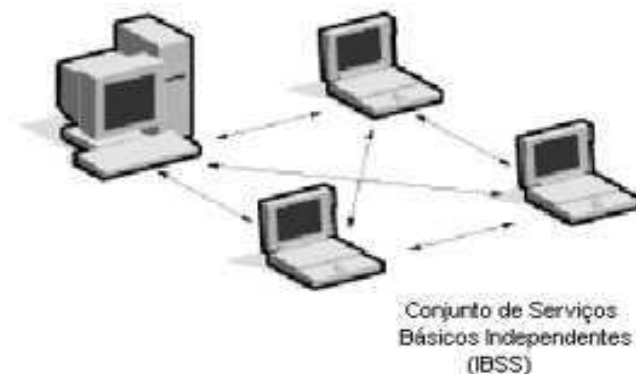


Figura 2.4: Modo de operação: *Ad-Hoc*

2.3 Comparando as duas redes

É útil se fazer um paralelo entre a rede de telefonia celular e a rede de computadores sem fio face à existência de grandes semelhanças entre as duas redes.

Um sistema celular pode ser descrito por três elementos básicos, além de suas interconexões (ALENCAR, 1998b), (ALENCAR, 2004), (DODD, 2000), (NASCIMENTO, 2000):

- Centro de Comutação e Controle (CCC);
- Estação Rádio Base (ERB);
- Terminal(Estação) Móvel (EM).

Já em uma rede de computadores *wireless* (sem fio), temos (IEEE, 1999a), (IEEE, 1999b):

- Máquina "Servidor";
- Ponto de Acesso;
- Usuários (PC's e/ou Notebooks).

Na telefonia celular a CCC é responsável pela comutação do serviço celular, realizando a interface com a rede de comutação pública, controle de tráfego e conexão com outras ERB's. A máquina "servidor" realiza tarefas semelhantes na rede sem fio, a saber: interface com o acesso à Internet; controle do tráfego de dados das máquinas clientes e dos pontos de acesso.

A ERB (Estação Rádio Base) compreende as seguintes unidades funcionais (ALENCAR, 1998b):

- Grupo de Rádio (GCR);
- Interface Rádio Central (IRC);
- Combinador de Antenas;
- Antenas e fontes de alimentação.

Na rede sem fio, na estação rádio base, temos:

- Ponto de Acesso (AP), aqui é onde se apresenta a maior diferença de funcionamento entre os dois sistemas; Na Telefonica Celular existe um grupo de rádio, um canal disponível para cada usuário, enquanto na rede sem fio o mesmo canal é compartilhado por todos, semelhante ao sistema CDMA.
- Interface LAN, que trabalha como adaptador entre os sinais do ponto de acesso e do servidor. No próprio equipamento de acesso já está disponível a porta LAN (10 Mbps e/ou 100 Mbps);
- Combinador de Antenas, caso haja necessidade de se colocar várias antenas ligadas ao mesmo ponto de acesso;
- Antenas e fontes de alimentação,

No caso da telefonia celular (i.e. AMPS) (ALENCAR, 1998b) são disponíveis 666 canais (Banda A e B) de 30 kHz no sentido da Estação Móvel para a ERB, alocados na faixa de 825 à 845 MHz e mais 666 canais de 30 kHz no sentido da ERB para a EM na faixa de 870 à 890 MHz, como pode ser observado nas Figuras 2.5 e 2.6, a seguir.



Figura 2.5: Canais utilizados na telefonia móvel celular analógica exibidos separadamente para comunicação: (a) Sentido Celular => ERB e (b) Sentido ERB => Celular

Na rede sem fio (*wireless*), temos a utilização da faixa de frequência de 2412 MHz à 2462 MHz (IEEE, 1999a) (IEEE, 1999b), divididos em 11 canais de 5 MHz cada um. A faixa de

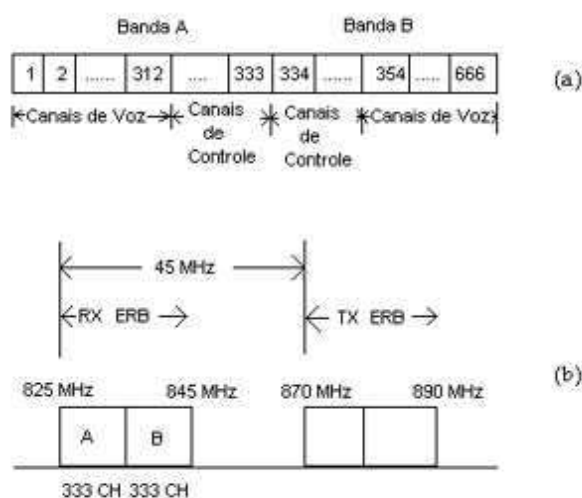


Figura 2.6: Detalhamento dos canais do sistema AMPS, onde em (a) temos as bandas A e B lado a lado, explicitando os canais de voz e de controle para cada banda e em (b) se observa os canais de comunicações de entrada e saída da ERB

frequência de 2400 à 2483 MHz, que faz parte da chamada banda ISM (Industrial, Scientific and Medical - Industrial, Científico e Médico) (ANATEL, 2006a), é de uso livre desde que os equipamentos utilizados funcionem dentro da legislação vigente (ANATEL, 2006c) (ANATEL, 2006b) e sejam homologados pelos órgãos reguladores (ANATEL no Brasil, FCC nos EUA, etc).

Como descrito em (IEEE, 1999a) (IEEE, 1999b), cada ponto de acesso utiliza um canal, dos onze disponíveis, e todos os clientes conectados neste ponto de acesso utilizam o compartilhamento do mesmo canal de 5 MHz. Processo semelhante é feito na rede de telefonia celular CDMA, Figura 2.7 (ALENCAR, 1998b) (ALENCAR, 2004) (CAVALCANTE, 1999) (DODD, 2000) (NASCIMENTO, 2000).

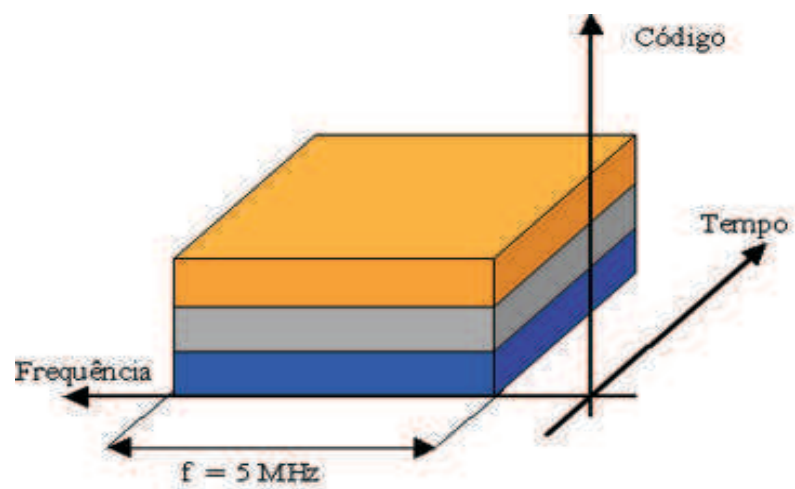


Figura 2.7: Utilização do canal no sistema wireless

Capítulo 3

Modelos de Propagação

Neste capítulo procura-se analisar alguns dos principais modelos destinados ao cálculo da predição das perdas de propagação em ambientes urbanos. Os modelos abordados neste trabalho terão características determinísticas, empíricas e/ou estatísticas. Todos buscam uma descrição do ambiente de propagação e são focados, principalmente, na utilização de serviços de telefonia móvel celular (CAVALCANTE, 1999). Após a descrição dos modelos é feita a utilização de cada um deles no caso específico da propagação da rede de computadores sem fio em um ambiente urbano. Deve-se ressaltar que na maioria dos modelos abordados a seguir, a faixa de frequência utilizada, 2400 - 2483 MHz, está acima da faixa de validade da maioria dos modelos teóricos apresentados. Esta restrição é, inicialmente, ignorada e ao final do trabalho, de posse dos resultados comparativos, é comentado a influência desta consideração sobre os erros cometidos. Outro fator importante é que, os modelos são abordados, aqui, da maneira na qual originalmente foram apresentados em estudos e publicações internacionalmente reconhecidas. Após isso, cada modelo, quando possível, é ajustado para as condições encontradas neste trabalho.

3.1 Modelo de Okumura-Hata

Yoshihisa Okumura publicou, junto com seus colaboradores, em setembro de 1968 o trabalho (OKUMURA, 1968) onde foram realizados testes detalhados para os serviços de radio móvel nas bandas de VHF (200 MHz) e UHF (453, 922, 1310, 1430 e 1920 MHz) em vários tipos de situações de terreno e de ambiente de comunicação móvel. Os resultados analisados estatisticamente foram descritos como dependentes da distância, frequência, localização, altura das antenas das estações rádios base e da estação móvel em ambientes urbanos, suburbanos e áreas abertas e terrenos quase-planos.

O trabalho acima serve como referência para muitas das publicações subseqüentes e é um

dos principais marcos na busca da descrição do ambiente de propagação para serviços de radio móvel. Okumura coordenou um trabalho extenso e detalhado nas vizinhanças da cidade de Tóquio (Japão), realizando uma série de medições de intensidade de campo recebido.

A faixa de validade da frequência é de 150 até 2000 MHz, para distâncias de 1 a 100 km e altura efetiva da antena da ERB de 30 a 1000 metros.

Várias características de atenuações e variações do nível de sinal foram levantadas e questionadas. Tabelas, gráficos e diversos parâmetros como: potência transmitida, antena transmissora e receptora (tipo e ganho) e frequências utilizadas foram mostrados no trabalho bem extenso e com muitas informações. Ondulações e variações de terreno no caminho de propagação, também foram avaliados com auxílios de mapas (1:50 000).

No entanto, mesmo com todas estas informações coletadas, ainda faltava uma síntese destas informações para uma utilização rápida e fácil em projetos e simulações em ambientes computacionais. Esta síntese foi feita por Masaharu Hata (HATA, 1980) através de uma fórmula empírica para as perdas na propagação derivada das medições feitas por Okumura (OKUMURA, 1968) com o objetivo de introduzir os dados coletados, no método de predição das perdas de propagação, em uma forma mais simples para uso computacional. Pode-se dizer que isso ajudou e muito na manipulação e comparação dos dados coletados por Okumura para diversas outras situações e ambientes.

Hata desenvolveu uma fórmula aplicável ao projeto de radio móvel de UHF e VHF. O erro cometido na utilização desta fórmula é bastante pequeno, entre 0 e 2dB nas condições:

- Faixa de frequência de 100 - 1500 MHz;
- Distância 1-20 km;
- Altura da antena da estação rádio base 30 - 200 m;
- A altura da antena da EM 1 - 10 metros.

A partir daí, Hata observou que muitos autores haviam desenvolvido métodos que permitiam calcular o sinal que seria recebido de um determinado transmissor e que as perdas na propagação tinham uma dependência logarítmica com a distância.

Com isso foram feitas algumas considerações no modelo de Okumura (HATA, 1980), citadas abaixo:

- É considerada a perda na propagação entre duas antenas isotrópicas;
- O terreno considerado é o quase-plano;

- As perdas na propagação em áreas urbanas são consideradas como padrão. Um fator de correção é utilizado para as demais áreas.

As equações de perdas obtidas em (HATA, 1980) são, conforme a região:

1. Área urbana

$$L_p = 69,55 + 26,16 \log f_c - 13,82 \log h_b - a^* + (44,9 - 6,55 \log h_b) \log R \quad (3.1)$$

Onde:

- f_c = Frequência 150 - 1500 (MHz)
- h_b = Altura efetiva da antena da estação rádio base 30 - 200 (m)
- h_m = Altura da antena da estação móvel 1 - 10 (m)
- R = Distância 1 - 20 (km)
- a^* = Fator de correção que assume valores característicos conforme a dimensão da área.

* Neste caso destaca-se que o fator a é uma função da altura do móvel. Este Fator de correção para a altura da estação móvel é mostrado abaixo para cada tipo de ambiente urbano:

(a) Cidade pequena - média

$$a = (1,1 \log f_c - 0,7) h_m - (1,56 \log f_c - 0,8) \quad (3.2)$$

(b) Cidade grande

$$a = 8,29(\log 1,54 h_m)^2 - 1,1 \quad \text{para } f_c \leq 200 \text{ MHz} \quad (3.3)$$

e

$$a = 3,2(\log 11,75 h_m)^2 - 4,97 \quad \text{para } f_c \geq 400 \text{ MHz} \quad (3.4)$$

2. Área Suburbana

$$L_{ps} = L_p\{AreaUrbana\} - 2\{\log(\frac{f_c}{28})\}^2 - 5,4 \quad (3.5)$$

3. Área aberta

$$L_{op} = L_p\{AreaUrbana\} - 4,78(\log f_c)^2 - 18,33 \log f_c - 40,94 \quad (3.6)$$

As equações acima são do modelo conhecido como modelo de Okumura-Hata. Fazendo uma breve análise para a situação deste trabalho, a propagação de redes de computadores sem fio em ambiente urbano e no enlace de dados entre duas cidades, verificamos que as condições de validade das equações acima são as mesmas para os caso estudado, com exceção da frequência. A faixa utilizada é de 2400- 2483 MHz. Assim tanto para a condição da propagação em ambiente urbano quanto na situação do enlace entre duas cidades o modelo de Okumura-Hata só não é "totalmente" válido para utilização devido à frequência que utilizamos estar acima da frequência máxima sugerida por Hata (HATA, 1980) (900 MHz acima) e das medições feitas por Okumura (OKUMURA, 1968) (aproximadamente 500 MHz acima). Nas demais condições, altura da antena da ERB, altura da antena da EM (Estação Móvel), que no nosso caso é fixa e a distância ERB - EM, o modelo poderia ser utilizado sem qualquer tipo de alteração.

No entanto, mesmo a frequência utilizada estando acima do modelo proposto em (HATA, 1980), as equações do modelo serão utilizadas tendo em vista a importância do mesmo e para efeitos de comparação com os demais modelos mais adequados e a para possíveis observações e conclusões dos resultados.

Desta forma, do modelo de Okumura-Hata, serão utilizadas as equações 3.1, 3.2 e 3.5 na situação de propagação em ambiente urbano da rede sem fio de computadores.

3.2 Modelo do CCIR

Um modelo baseado no modelo de Okumura-Hata foi publicado pelo CCIR (Consultative Committee for International Radio, hoje, ITU-R - International Telecommunication Union - Radio-communication Sector) (LEE; MILLER, 1998) e é dado por:

$$L = 69,55 + 26,16 \log f_c - 13,82 \log h_b - a + (44,9 - 6,55 \log h_b) \log R - B \quad (3.7)$$

Onde o termo a é o mesmo da equação 3.1

As equações 3.1 e 3.7 são as mesmas com exceção do termo B , acrescentado no fim da equação 3.7. Este termo, B , é um fator de correção, porcentagem de prédios sobre o terreno B_1 , dado por:

$$B = 30 - 25 \log B_1 \quad (3.8)$$

Em que:

B_1 é a Porcentagem de prédios sobre o terreno varia de 3 a 50.

Este fator de correção é semelhante aos adicionados por Hata (HATA, 1980) nas equações 3.5 e 3.6 para correções na predição das perdas de propagação em áreas suburbanas e abertas respectivamente. Observa-se que Okumura (OKUMURA, 1968) considerou o ambiente urbano como situação padrão. Torna-se então necessária à inclusão de fatores de correção para as ambientes de abertos e áreas suburbanas. As duas equações acima também são utilizadas, neste trabalho, pelo fato de terem sido sugeridas pelo CCIR (ITU), órgão internacional de regulamentação em telecomunicações.

3.3 Modelo de Hata-Estendido

O Modelo de Hata-Estendido foi desenvolvido durante os estudos para aplicações de PCS (Personal Communication Services - Serviços de Comunicações Pessoais), que utilizam a faixa de 1,5 a 2 GHz, pelo comitê de estudos Europeus - COST 231 (COST - Cooperation in Field of Scientific and Technical é um fórum de cooperação em pesquisa da União Européia) (LEE; MILLER, 1998) (COST231, 2005) (COST, 1991).

De acordo com o COST 231, o modelo de Hata subestima as perdas de propagação e um "Modelo de Hata-Estendido" foi desenvolvido para correção em algumas situações. Como pode ser observado na equação a seguir, este modelo ajusta alguns parâmetros da equação para que a mesma tenha validade na faixa de frequências de 1500 a 2000 MHz.

$$L_{xhata} = 46,33 + (44,9 - 6,55 \log h_b) \log R + 33,9 \log f_c - a - 13,82 \log h_b + C \quad (3.9)$$

Onde, C é um parâmetro de ajuste compreendendo se possível às situações seguintes:

1. $C = 0$, para cidades de porte médio e áreas suburbanas.
2. $C = 3$, para grandes centros urbanos.

O termo a é o mesmo utilizado nas equações 3.2 a 3.4 e abrange os dois tipos de área: urbana ou suburbana.

A validade se dá dentro das restrições abaixo:

$$1500 \leq f_c \leq 2000 MHz \quad (3.10)$$

$$1 \leq R \leq 10 km \quad (3.11)$$

$$30 \leq h_b \leq 200 m \quad (3.12)$$

$$1 \leq h_m \leq 10 m \quad (3.13)$$

Este modelo e o apresentado a seguir são baseados no de Okumura-Hata (OKUMURA, 1968). E neste caso são feitos ajustes para diminuir o erro cometido. Em ambos, observa-se um aumento da faixa de frequência de validade do modelo. Isso faz com que o erro que cometido utilizando este modelo diminua. O modelo, a seguir, permite a utilização sem a restrição de frequência.

3. Okumura-Hata modifi ado

Apresentamos agora, outro modelo importante referenciado por diversos textos sobre o assunto (CAVALCANTE, 1999) e que segue a mesma linha de raciocínio dos dois últimos apresentados. Novamente, são feitas modificações nas equações de Hata (HATA, 1980) através da incorporação de novos fatores (CAVALCANTE, 1999), apresentados abaixo, que permite que a precisão das fórmulas de Hata possam ser elevadas dentro da faixa total de validade das curvas de Okumura.

As equações modificadas de Hata são mostradas abaixo:

1. Funções de transição:

$$F_1 = \frac{300^4}{f_c^4 + 300^4} \quad (3.14)$$

$$F_2 = \frac{f_c^4}{300^4 + f_c^4} \quad (3.15)$$

2. Fator de correção da curvatura da terra:

$$S_{ks} = \left[27 + \frac{f_c}{230}\right] \log\left[\frac{17 \cdot (h_b + 20)}{17(h_b + 20) + R^2}\right] + 1,3 - \frac{|f_c - 55|}{750} \quad (3.16)$$

Onde:

f_c = Frequência 100 - 3000 (MHz)

h_b = Altura efetiva da antena da estação radio base 30 - 300 (m)

h_m = Altura da antena da estação móvel 1 - 10 (m)

R = Distância 1 - 100 (km)

3. O Fator de correção para áreas urbanas / suburbanas pode ser encontrado de:

$$S_o = (1 - U_r)[(1 - 2U_r)L_{po} + 4U_rL_{ps}] \quad (3.17)$$

U : 0 ou 1 / vale zero para cidade pequena ou média e um para centros urbanos

U_r = Área aberta seu valor é zero; Suburbanas seu valor é 0,5 e 1 para áreas urbanas.

L_{po} e L_{ps} são obtidos a partir das equações 3.5 e 3.6.

4. Fator geral de correção da altura da antena móvel:

$$a_x = (1 - U)a + U[a_2F_1 + a_4F_2] \quad (3.18)$$

Aqui o termo a é a equação 3.2 e os termos a_2 e a_4 se referem às equações 3.3 e 3.4, respectivamente.

5. O Fator da porcentagem de prédios sobre o terreno, é o mesmo da equação 3.8:

$$B_o = 25 \cdot \log(B_1) - 30 \quad (3.19)$$

Onde:

B_1 tem valor de 0,5 para áreas suburbanas e 1 para áreas urbanas.

Assim, a perda média de propagação é dada por:

$$L_{mh} = -(L_p + S_o + a_x + S_{ks} + B_o) \quad (3.20)$$

3.5 Modelo de Walfis h-Bertoni

O modelo a ser considerado, agora, é o de Walfisch-Bertoni (WALFISCH; BERTONI, 1988). Nele foi apresentado um modelo físico do processo de propagação em um ambiente urbano, explicando a influência das edificações residências, prédios comerciais e industriais.

Neste modelo é considerada uma antena, rádio base, elevada irradiando campos que se propagam sobre os topos das edificações em um processo de múltiplas difrações através de colunas de estruturas, que agem como cilindros de obstáculos, com dimensões maiores que o comprimento de onda. A situação do modelo pode ser bem visualizada observando a Figura 3.1.

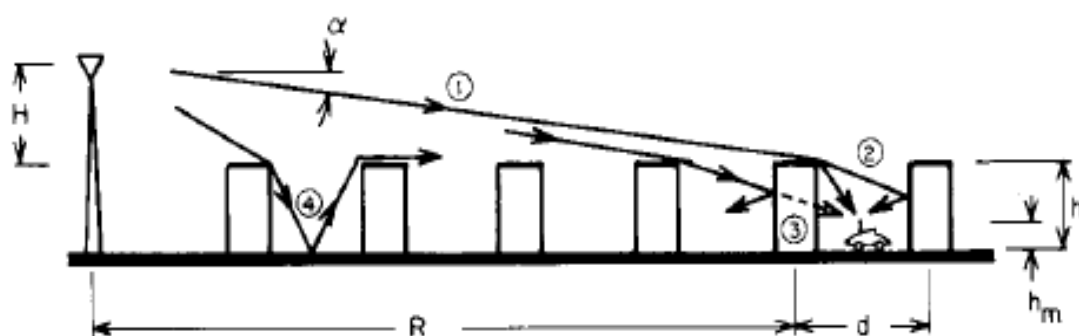


Figura 3.1: Modelo de Walfisch-Bertoni (WALFISCH; BERTONI, 1988)

Em suas publicações Walfisch-Bertoni (WALFISCH; BERTONI, 1988) (BERTONI, 2000) descreve condições e suposições em que o modelo é válido. No trabalho realizado aqui, é utilizado o modelo descrito em (WALFISCH; BERTONI, 1988) com algumas modificações para uma situação mais próxima ao caso aqui descrito.

A situação ora analisada difere um pouco do modelo inicialmente descrito. Mas já foi sugerido em (CHUNG; BERTONI, 1993), e é analisado mais adiante, o caso em que o receptor localiza-se no topo da edificação, mostrado pelo número 5 na Figura 3.2, e não no nível do solo como indica o número 2 tanto na Figura 3.1 quanto na Figura 3.2. A comunicação entre a estação base da rede sem fio e a antena instalada no cliente pode ser visualizada pela modificação na localização do receptor e marcado com 5 na Figura 3.2.

Com estas alterações, o receptor cliente está no topo do edifício e/ou casa, marcado na Figura 3.2 com o número 5 e não mais ao nível do solo como marcado pelo número 2, Figura 3.1. A linha de visada direta com a estação base, mostrada pelo raio marcado com o número 1, vai nos levar a uma necessidade de modificação nos parâmetros do modelo de Walfisch-Bertoni. Isso já foi feito pelo próprio Bertoni (CHUNG; BERTONI, 1993) em que ele descreve uma situação de propagação bem semelhante à encontrada neste trabalho e que é descrita mais adiante.

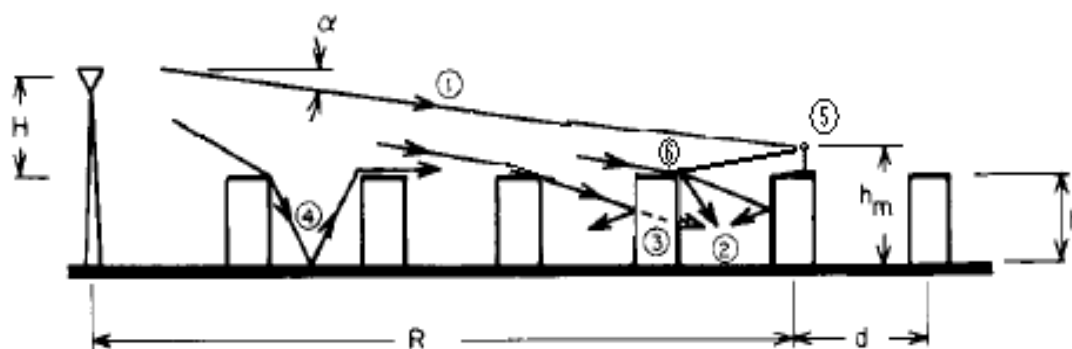


Figura 3.2: Modelo de Walfisch-Bertoni na situação deste trabalho

Os demais componentes do sinal, mostrado pelos raios (caminhos) numerados por 2, 3, 4 e 6, são as diversas maneiras que o sinal transmitido pode se propagar até chegar ao receptor. Este processo foi bem detalhado por Ikegami (IKEGAMI; YOSHIDA, 1980). Assim o sinal total recebido é a composição dos diversos sinais, que, de acordo com a fase temporal (tempo em que eles chegam ao receptor) e nível de potência pode torna-se um ruído, causando desvanecimento na componente principal do sinal ou aumentar o nível de sinal recebido.

Considerações do modelo são citadas abaixo. Deve-se ressaltar que avaliações do modelo feitas por (CHUNG; BERTONI, 1993) (CHRYSANTHOU; BERTONI, 1990) (SAUNDERS; BONAR, 1991) e (MACIEL; XIA, 1993) mostram que quanto mais próximas forem às condições reais, das condições do modelo, melhor será a predição das perdas na propagação.

Considerações feitas neste modelo:

- Propagação em ambiente urbano;
- Frequência de validade do modelo: 300 MHz - 3 GHz;
- Uma estação base fixa e elevada radiando campos que se propagam por sobre os topos dos prédios e casas por um processo de múltiplas difrações sobre as estruturas;
- O ambiente urbano é composto de residências, prédios comerciais e industriais;
- Alguns parâmetros que influenciam na propagação: altura das edificações, largura das ruas, rugosidade do terreno e espaçamento entre as edificações;
- Grande parte do sinal não consegue atravessar estruturas sólidas;
- As colunas de edificações são consideradas como formas cilíndricas de obstáculos sobre o terreno;

- A propagação por cima dos edifícios envolve difração por uma série de cilindros paralelos com dimensões bem maiores que o comprimento de onda;
- A maioria das áreas possui construções com uma relativa uniformidade de altura e se espalhando por vários blocos exceto por alguns picos de edifícios mais altos;

O modelamento feito em (WALFISCH; BERTONI, 1988), Figura 3.1, é utilizado para encontrar a perda média entre uma antena transmissora e o móvel. A perda total é encontrada a partir de três fatores:

- Perdas de propagação entre as antenas no espaço livre;
- A redução do Q através das edificações, descrito a seguir;
- O efeito da difração do topo das edificações até o nível do solo.

É necessário reafirmar que, como a antena do cliente está no topo das edificações o 3º fator, difração, citado acima, não será considerado no cálculo de comparação com as perdas de propagação na rede de computadores sem fio.

A perda no espaço livre, sem considerar os ganhos das antenas, é dada por:

$$L_o = 32,4 + 20 \log f_c + 20 \log R \quad (3.21)$$

Onde:

f_c é a frequência em MHz.

R é a distância entre antena transmissora e a antena receptora em km.

Nas equações encontradas por Bertoni (WALFISCH; BERTONI, 1988), temos:

$$Q \cong 0,1 \left[\frac{\alpha \sqrt{\frac{d}{\lambda}}}{0,03} \right] \quad (3.22)$$

O termo d , acima, é a distância média de separação entre os prédios.

Se

$$g_p = \alpha \sqrt{\frac{d}{\lambda}} \quad (3.23)$$

Logo o termo Q, redução da amplitude do sinal por difrações múltiplas, pode ser obtido da eq.(3.24) e incorporado na eq.(3.27) por Bertoni (WALFISCH; BERTONI, 1988):

$$Q \cong 2,35g_p^{0,9} \quad \text{para } 0,01 < g_p < 0,4 \quad (3.24)$$

Onde:

O ângulo α , em radianos, ver Figura 3.1, é dado por:

$$\alpha = \frac{H}{R} - \frac{R}{2R_e} \quad (3.25)$$

e pode ser aproximado pela equação:

$$\alpha \cong \frac{H}{R} \quad (3.26)$$

R_e é o raio efetivo da terra e vale aproximadamente $8,5 \cdot 10^3$ km.

H é altura, da antena transmissora, acima da altura média das edificações, h .

O desenvolvimento utilizado para se obter as equações acima pode ser visto em (WALFISCH; BERTONI, 1988) e (BERTONI, 2000). Aqui mostram-se apenas os resultados obtidos para as perdas excedentes (L_{ex}) na propagação entre a antena transmissora e a antena receptora no nível do solo:

$$L_{ex} = 57,1 + A + \log f_c + 18 \log R - 18 \log H - 18 \log \left[1 - \frac{R^2}{17H} \right] \quad (3.27)$$

O último termo é a parcela A da curvatura da terra e o valor de A é dado por:

$$A = 5 \log \left[\left(\frac{d}{2} \right)^2 + (h - h_m)^2 \right] - 9 \log d + 20 \log \left\{ \arctan \left[\frac{2(h - h_m)}{d} \right] \right\} \quad (3.28)$$

Ele representa a influência da geometria das edificações sobre o nível de sinal que chega ao móvel situado perto do solo.

Na equação acima:

- h é altura média, considerada, das edificações.
- h_m é altura receptor móvel.

Para obter-se o nível do sinal que chega no receptor precisa-se somar a potência transmitida com os ganhos das antenas transmissora e receptora e em seguida subtrair os resultados obtidos de L_o (3.21) e L_{ex} (3.27).

3.6 Modelo Walfish-Ikegami (COST 231)

As comunicações móveis sofrem com as atenuações de múltiplos percursos causados por "objetos" em volta da EM. Isto é ainda mais acentuado em áreas de alta densidade urbana onde a demanda por comunicação é concentrada e, portanto maiores as necessidades por sistemas de comunicações, economicamente viáveis e de um maior desempenho.

Por essa razão é extremamente necessário um método preciso de predição nas perdas de propagação para poder encontrar técnicas que aumentem o desempenho da transmissão.

No entanto, o fenômeno da propagação em tais ambientes é considerado muito complicado para ser feita uma formulação simples. Isso porque o efeito dos múltiplos percursos em geral é aleatório, devido ao ambiente variável entre o transmissor e o receptor.

Em (IKEGAMI; YOSHIDA, 1980) Ikegami realiza uma análise física da propagação em múltiplos percursos em áreas urbanas. São analisadas as componentes da propagação em ambiente urbano do ponto de vista microscópico e é mostrado como as ondas de rádio se propagam até o receptor em áreas urbanas observando o ângulo de incidência, o comprimento do percurso e o nível do sinal medido para cada componente do sinal de multipercurso. Os valores experimentais indicam que apenas um número limitado de componentes da teoria dos raios (IKEGAMI; YOSHIDA, 1980) (IKEGAMI S. YOSHIDA; UMEHIRA, 1984) (IKEGAMI; YOSHIDA, 1991) tem alguma importância significativa na propagação em ambientes urbanos.

Ikegami mostra, em tabelas, que os valores calculados foram obtidos considerando uma atenuação de 6 dB para cada reflexão nas paredes das edificações baseadas em dados experimentais.

A interferência na propagação via rádio em áreas urbanas foi considerada como um fenômeno aleatório. Isso porque o terreno sobre o qual ocorre a propagação é caracterizado por estruturas artificiais, edificações e torres, que possuem tamanhos, formas e materiais muito diversificados. Muitas das ondas que chegam ao receptor em ambiente urbanos têm direções variadas. O número de ondas principais é limitado a três ou quatro. Uma onda pode ser considerada como "principal" quando seu nível de sinal é suficientemente forte e não conte com componentes de atraso muito longo.

Na Europa, um grupo de pesquisa chamado (COST) buscou desenvolver modelos empíricos e semi-empíricos que descrevessem a propagação rádio móvel.

Em particular, o projeto 231 (COST 231) (LEE; MILLER, 1998), (COST231, 2005), (COST, 1991), (IKEGAMI; YOSHIDA, 1980), (IKEGAMI S. YOSHIDA; UMEHIRA, 1984) e (IKEGAMI; YOSHIDA, 1991) intitulado "Evolution of Land Mobile Radio Communication", resultou na recomendação da adoção de um modelo de propagação para a telefonia celular e aplicações PCS pela ITU (International Telecommunications Union). Este modelo semi-determinístico para células de tamanho médio a grande, também é chamado de modelo Walfish-Ikegami, pois tem

como referencia os trabalhos feitos Walfisch-Bertoni (WALFISCH; BERTONI, 1988) e Ikegami (IKEGAMI; YOSHIDA, 1980), (IKEGAMI S. YOSHIDA; UMEHIRA, 1984).

A Figura 3.3, abaixo, ilustra os diversos parâmetros utilizados no modelo.

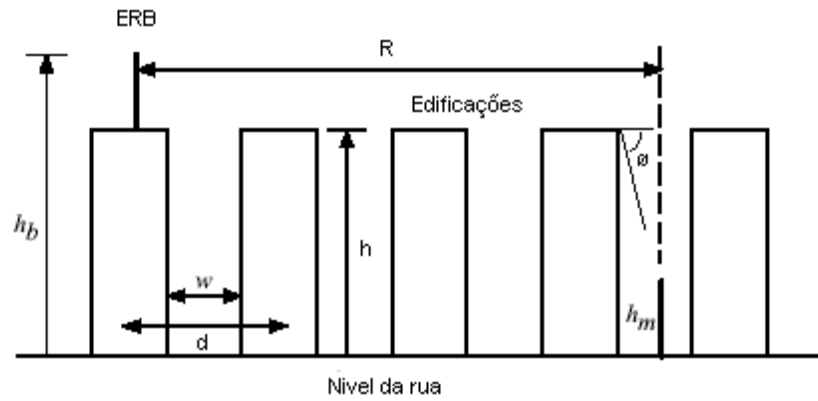


Figura 3.3: Modelo de Walfisch-Ikegami e seus parâmetros (IKEGAMI; YOSHIDA, 1980)

Onde:

f_c = Frequência de operação na faixa de 800 a 2000 MHz

R = Distância ERB-EM de 0,02 a 5 km.

h_b = Altura da estação rádio base sobre o nível da rua, entre 4 e 50 metros.

h_m = Altura da antena da estação móvel entre 1 e 3 metros.

h = Altura média das edificações (metros).

$H = \Delta h_b = h_b - h$, Altura da antena da ERB acima das edificações.

$\Delta h_m = h - h_m$, Altura da antena da EM abaixo das edificações.

d = Separação entre edificações, na faixa de 20 a 50 m, se não houver informações.

w = Largura da rua (Utiliza-se $d/2$ se não houver informações).

ϕ = Ângulo de incidência da onda em direção ao nível da rua. Usa-se 90° se não houver informações.

Na situação em que a altura da antena da estação rádio base é maior ou igual a 30 metros, garantindo a LOS (Line of Sight) e que a 1ª zona de Fresnel tenha o menor grau de obstrução, as perdas no caminho de propagação são dadas por:

$$L_{LOS} = L_{fs} + 10,19 + 6 \log R \quad (3.29)$$

onde:

$$L_{fs} = 32,45 + 20 \log R + 20 \log f_c \quad (3.30)$$

é a perda no espaço livre, repetido aqui por conveniência.

Na falta de informações sobre a altura média das edificações, pode-se estimar a altura em metros como três vezes o número de andares mais três metros se o telhado não for plano.

Na situação em que a propagação seja NLOS (Non Line of Sight), o modelo sugere a seguinte equação para as perdas:

$$L_{NLOS} = L_{fs} + L_{rts} + L_{mds} \quad \text{para } L_{rts} + L_{mds} \geq 0 \quad (3.31)$$

ou

$$L_{NLOS} = L_{fs} \quad \text{para } L_{rts} + L_{mds} < 0 \quad (3.32)$$

Onde:

L_{rts} é a perdas da última difração ao nível do solo.

L_{mds} é a perdas por múltiplas difrações.

O L_{rts} pode ser calculado por:

$$L_{rts} = -16,9 - 10 \log w + 10 \log f_c + 20 \log \Delta h_m + L_{ori} \quad (3.33)$$

onde L_{ori} , perdas de orientação, é:

$$L_{ori} = -10 + 0,345\phi \quad \text{para } 0 \leq \phi < 35^\circ \quad (3.34)$$

$$L_{ori} = 2,5 + 0,075(\phi - 35^\circ) \quad \text{para } 35^\circ \leq \phi < 55^\circ \quad (3.35)$$

$$L_{ori} = 4,0 - 0,114(\phi - 55^\circ) \quad \text{para } 55^\circ \leq \phi < 90^\circ \quad (3.36)$$

Na Figura 3.4 a seguir, os três casos acima, envolvendo diferentes angulações, são visualizados.

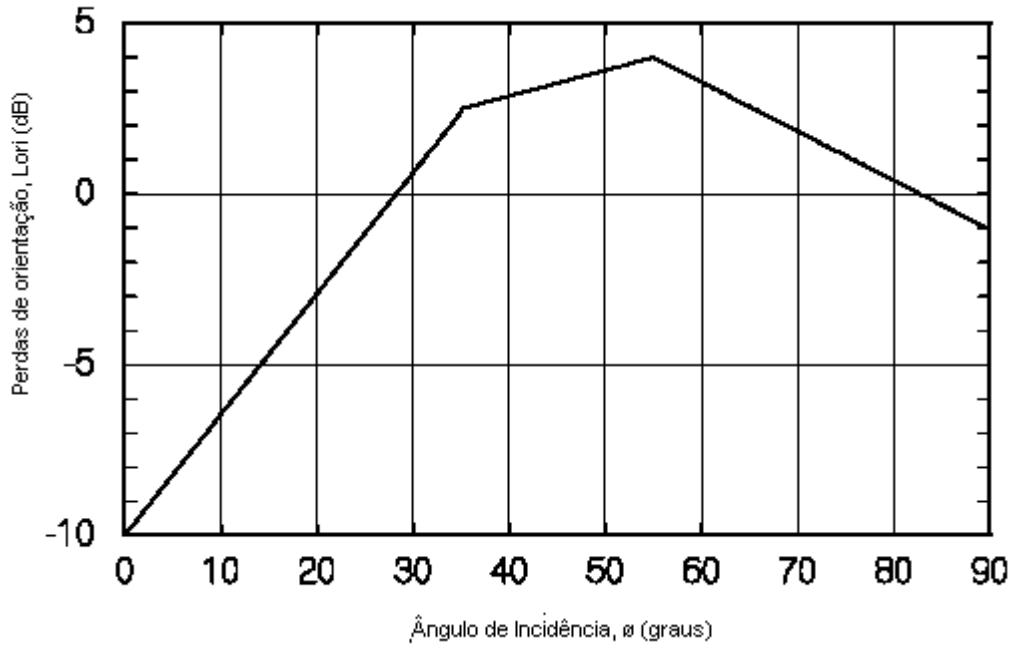


Figura 3.4: Perdas por orientação (IKEGAMI; YOSHIDA, 1980)

As perdas por múltiplas difrações são dadas por:

$$L_{msd} = L_{bsh} + k_a + k_d \log R + k_f \log f_c - 9 \log d \quad (3.37)$$

onde:

L_{bsh} é a perda por sombreamento, dada pelas equações:

1.

$$L_{bsh} = -18 \log(1 + \Delta h_b) \quad \text{para } \Delta h_b > 0 \quad (3.38)$$

2.

$$L_{bsh} = 0 \quad \text{para } \Delta h_b \leq 0 \quad (3.39)$$

L_{msd} depende, além da largura média das edificações, d , da altura média da ERB, H (Δh_b), da distância entre a ERB e o cliente, R (km), e das quantidades k_a , k_d e k_f descritas a seguir.

k_a é definido segundo as três situações abaixo:

1.

$$k_a = 54 \quad \text{para } \Delta h_b > 0 \quad (3.40)$$

2.

$$k_a = 54 + 0,8|\Delta h_b| \quad \text{para } \Delta h_b \leq 0 \quad e \quad R \geq 0,5 \quad (3.41)$$

3.

$$k_a = 54 + 0,8|\Delta h_b|(\frac{R}{0,5}) \quad \text{para } \Delta h_b \leq 0 \quad e \quad R < 0,5 \quad (3.42)$$

Verifica-se que no caso 1, a condição determinante é a variação positiva da altura da ERB. Nos casos, 2 e 3 a altura da ERB é no máximo zero e ocorre ainda a influência da distância entre a ERB e o cliente.

O fator da distância, k_d , é determinado por:

1.

$$k_d = 18 \quad (3.43)$$

2.

$$k_d = 18 + 15(\frac{|\Delta h_b|}{h_B}) \quad (3.44)$$

Nestes casos, quando a altura da ERB é maior que altura média das edificações então k_d é constante, caso 1. Caso contrário, 2, k_d varia em função da diferença de alturas e da própria altura da ERB.

O fator da frequência, k_f , é definido, segundo a densidade de ocupação (população e/ou edificações), como abaixo:

1.

$$k_f = -4 + 0,7(\frac{f_c}{925} - 1) \quad (3.45)$$

para cidades médias ou áreas suburbanas.

2.

$$k_f = -4 + 1,5(\frac{f_c}{925} - 1) \quad (3.46)$$

para áreas metropolitanas.

3.7 Modelo Maciel-Bertoni-Xia

O modelo de Maciel-Bertoni-Xia (MACIEL; XIA, 1993), Figura 3.5, se caracteriza por apresentar um resultado teórico do sinal recebido no celular no nível da rua que é função da altura da ERB. As condições do ambiente urbano são bem semelhantes aos apresentados no modelo de Walfisch-Bertoni, descrevendo áreas residenciais, comerciais e industriais, faixa de frequência, modelamento das edificações e parâmetros que influenciam na propagação. O principal diferencial neste modelo é sua dependência com a altura da estação rádio base. Esta dependência é válida tanto para uma altura da ERB acima do nível médio das edificações situadas ao seu redor como para uma situação abaixo do nível médio das edificações.

Outros pontos importantes descritos em (MACIEL; XIA, 1993) são:

- A linha de visada (LOS - Line of Sight) será de grande importância no momento de definir a área de cobertura para antenas baixas por causa das menores perdas de percurso comparadas à propagação sobre as edificações.
- Sinais interferentes são esperados nos resultados em propagações sem linha de visada (NLOS - Non Line of Sight).

A expressão desenvolvida para a influência da dependência da altura da estação rádio base sobre a média do sinal recebido pelo móvel ao nível da rua, foi deduzida a partir da dependência da predição com a distância, que foi desenvolvido em (WALFISCH; BERTONI, 1988) e (XIA; BERTONI, 1992).

Para seções das cidades que possuem uma certa uniformidade nas alturas dos edifícios e separadas em forma de colunas ao longo das ruas, a propagação entre a estação rádio base e o móvel é vista como uma propagação que ocorre sobre os topos das citadas edificações. O percurso de propagação é sugerido na Figura 3.5 e são usados os resultados obtidos previamente para difração múltiplas sobre obstáculos (XIA; BERTONI, 1992). A partir daí é derivada uma expressão teórica para a perda de percurso que será avaliada em função da altura da ERB.

A variação da média do sinal com a distância é encontrada supondo que as edificações tenham uma altura média igual à h (WALFISCH; BERTONI, 1988).

O desvio na altura média considerada, diferença na forma, no tipo de construção e possíveis lacunas ocasionam um desvanecimento lento. Para estações rádio base elevadas estas diferenças nas alturas e nos tipos das construções, quando colocadas juntas poderiam levar a um desvanecimento lento do tipo distribuição estatística LogNormal.

Neste modelo, inicialmente é providenciado um caminho sistemático para verificação das perdas na propagação e alterado seu valor conforme as alturas das estações rádio base. A partir

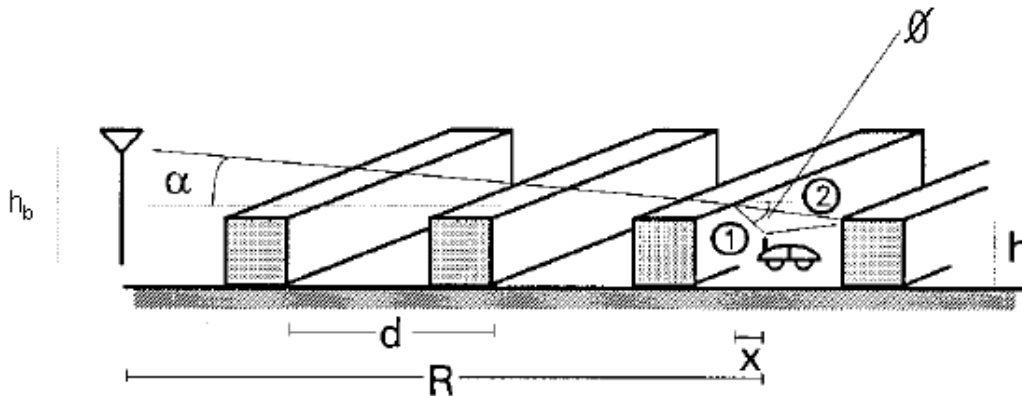


Figura 3.5: Modelo de Maciel-Bertoni-Xia (XIA; BERTONI, 1992)

daí são mostrados os resultados para estações rádio base com antenas altas e desenvolvida uma aproximação simples para antenas abaixo do nível das edificações. Os resultados obtidos são comparados utilizando (XIA; BERTONI, 1992) com medidas para a faixa de -8 m a 6 m.

Como no modelo de Walfisch-Bertoni, também neste, Figuras 3.5, 3.6, 3.7 e 3.8, a estação rádio base é considerada como fonte e o móvel como receptor. Outra consideração feita é a de que a perda total de propagação no percurso é a soma das perdas no espaço livre, L_o , com as perdas em excesso, L_{ex} .

Igual ao modelo anterior a perda no espaço livre, em dB, pode ser expressa por:

$$L_o = -10 \log \left[\left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \right] \quad (3.47)$$

Em que:

λ é o comprimento de onda e R é a distância entre a ERB e a EM.

A perda em excesso, L_{ex} , pode ser obtida com a soma de dois termos:

$$L_{ex} = L_{e1} + L_{e2} \quad (3.48)$$

O primeiro termo, L_{e1} , é obtido do campo difratado no topo da edificação e antes de chegar no receptor.

O segundo, L_{e2} , é a perda do campo resultante da propagação por cima das edificações.

As Figuras 3.6, 3.7 e 3.8, abaixo, mostram as situações para o cálculo de L_{e1} e L_{e2} .

L_{e1} pode ser obtido de (MACIEL; XIA, 1993):

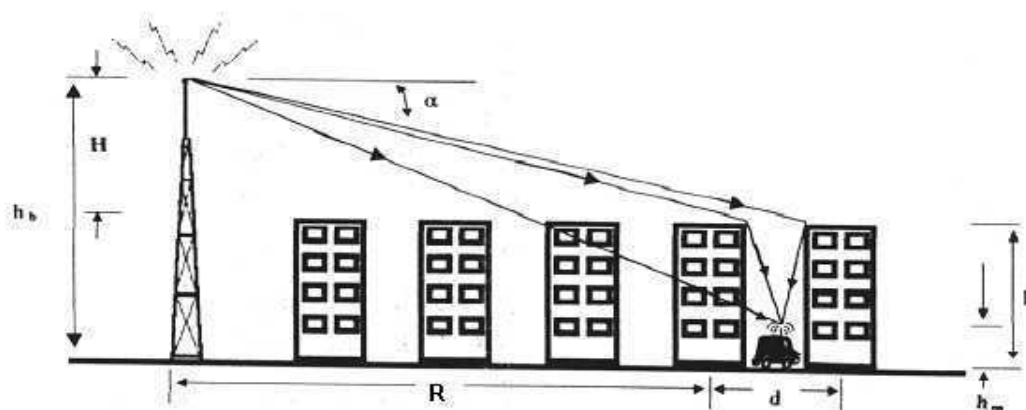


Figura 3.6: Modelo de Maciel-Bertoni-Xia - Estação Rádio Base acima do nível das edificações (CAVALCANTE, 1999)

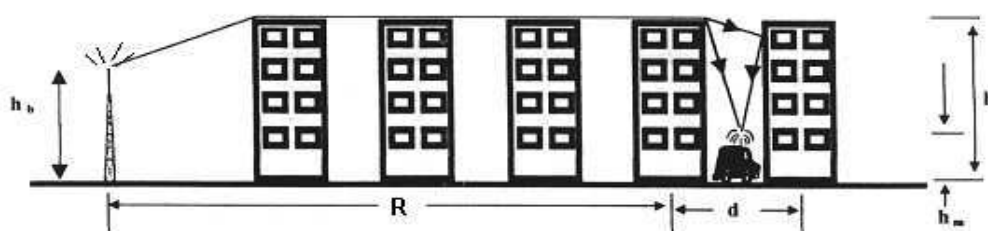


Figura 3.7: Modelo de Maciel-Bertoni-Xia - Estação Rádio Base abaixo do nível das edificações (CAVALCANTE, 1999)

$$L_{e1} = -10 \log \left[\frac{G_1}{\pi k r} \left(\frac{1}{\phi} - \frac{1}{2\pi + \phi} \right)^2 \right] \quad (3.49)$$

Onde:

G_1 é o ganho da antena do receptor na direção ϕ

k é o número de onda dado por $2\pi/\lambda$

$$\phi = \arctan \left(\frac{h - h_m}{x} \right) \quad (3.50)$$

$$r = \sqrt{(h - h_m)^2 + x^2} \quad (3.51)$$

L_{e2} é calculado de (MACIEL; XIA, 1993):

$$L_{e2} = -10 \log(G_2 Q^2) \quad (3.52)$$

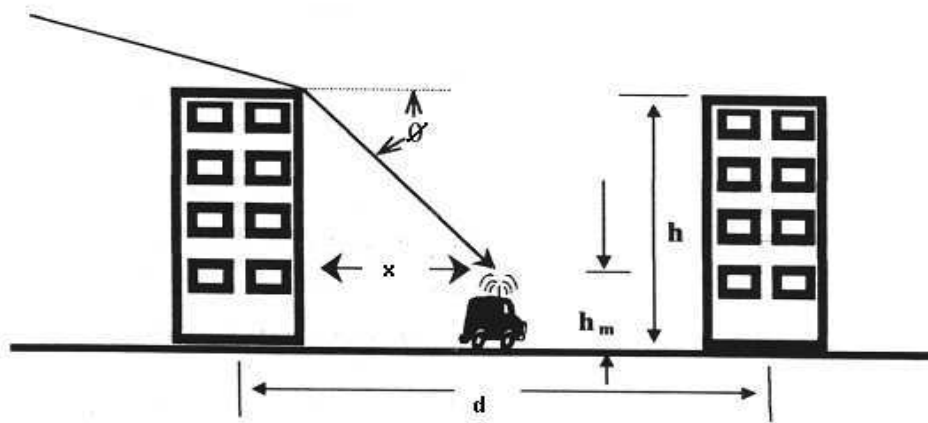


Figura 3.8: Modelo de Maciel-Bertoni-Xia - Geometria para o cálculo de L_{e1} (CAVALCANTE, 1999)

L_{e2} leva em consideração o ganho da antena transmissora (G_2). O valor de Q que foi avaliado em (WALFISCH; BERTONI, 1988) e (XIA; BERTONI, 1992) é definido a seguir, onde ele se comporta do mesmo modo, tanto com antenas baixas como altas. Quando se trata de antenas de grande altura, temos outra situação não abordada mostrada aqui.

L_{e2} para antenas altas:

Foi encontrada a dependência de Q em relação à altura da estação rádio base h_b , e com o espaçamento entre os prédios, d . Seu valor é dado pelas equações a seguir segundo o modelo de Marciel-Bertoni-Xia.

$$g_p = \alpha \sqrt{\frac{d}{\lambda}} \quad (3.53)$$

onde

$$\alpha = \arctan \frac{h_b - h}{R} \approx \frac{h_b - h}{R} \quad (3.54)$$

Assim,

$$Q = 3,50g_p - 3,327g_p^2 + 0,962g_p^3 \quad \text{para } 0,01 < g_p < 1 \quad (3.55)$$

O valor de Q que possui, segundo Xia (MACIEL; XIA, 1993), uma melhor precisão e uma faixa de validade mais ampla que o valor encontrado por Bertoni eq.(3.24).

No trabalho (MACIEL; XIA, 1993), também é avaliada a situação em que a estação base está abaixo da altura média das edificações. No entanto esta avaliação não é do interesse dos objetivos aqui propostos, sendo omitida por conveniência.

A equação 3.56 abaixo é o fator de correção da curvatura da terra (FCCT) (WALFISCH; BERTONI, 1988).

$$FCCT = -18 \log[1 - \frac{R^2}{17H}] \quad (3.56)$$

Onde: H é altura, da antena transmissora, acima da altura media das edificações, h .

3.8 Modelo simplifi ado Xia

Este modelo analítico explica a perda de percurso como um resultado da redução do sinal resultante da propagação no espaço livre devido às difrações múltiplas sobre as colunas de edificações e ao sombreamento da edificação.

Uma versão simplificada de (MACIEL; XIA, 1993) é desenvolvida e apresentada em (XIA; MACIEL, 1993), que pode ser usada em três situações diferentes: com a estação rádio base acima, abaixo e próxima ao nível médio das edificações.

A predição da propagação do sinal de rádio para cada situação específica do meio é essencial para proporcionar uma implementação rápida dos sistemas de comunicações sem fio, além de uma otimização e expansão das redes já existentes.

O sinal recebido pela estação móvel oriundo de uma estação rádio base à uma distância R é proporcional a

$$\frac{10^{\frac{\xi}{10}}}{R^\gamma} \quad (3.57)$$

Esta expressão também pode ser representada na notação logarítmica como uma soma de termos que compõem a perda do percurso L e uma componente de sombreamento estatística ξ . Em um ambiente típico do rádio móvel, ξ , é uma variável aleatória gaussiana com média zero e com um desvio padrão de 8 dB. Como o sombreamento é originado de um bloqueamento local de obstáculos ao redor da estação móvel, ela é geralmente independente da distância R . A componente da perda de percurso pode ser expressa na escala logarítmica como uma função linear de R

$$L = C + 10\gamma \log R \quad (3.58)$$

onde γ é o índice de inclinação e C é um ponto de interseção geralmente coletado da perda de percurso a 1 km. Os termos γ e C proporcionam uma maneira simples de medição na perda de percurso.

No entanto, limitações são encontradas quando se utilizam os modelos empíricos tradicionais. Isso porque eles foram desenvolvidos baseados tanto em medidas de áreas, quanto em frequências e alturas de antenas específicas. Sendo assim os modelos empíricos não se aplicam para serviços de rádio em diferentes frequências e diferentes ambientes de propagação.

Modelos analíticos desenvolvidos (WALFISCH; BERTONI, 1988), (XIA, 1997) e (JAKES, 1974) proporcionam um método mais genérico na predição das perdas de percurso.

Para atender as necessidades de projeto rápido da cobertura de uma célula, necessita-se verificar a interferência co-canal e canal adjacente, a capacidade do sistema. Desse modo, uma versão simplificada do modelo analítico é apresentada aqui, com validade em três situações diferentes de propagação: A estação rádio base esta bem acima do nível das edificações, abaixo do nível e um pouco acima.

O processo de propagação foi caracterizado como sendo o mais importante na descrição da rádio propagação em ambientes urbanos e suburbanos (WALFISCH; BERTONI, 1988). Nela ocorrem os seguintes fenômenos:

1. Perdas no espaço livre;
2. Difração do topo para o nível da rua;
3. Difrações múltiplas sobre as edificações.

As perdas totais podem ser expressas pela soma de três termos independentes: perdas no espaço livre L_{fs} , perdas da difração do topo ao nível da rua L_{rts} , e a redução por múltiplas difrações sobre as edificações L_{md}

$$L = L_{fs} + L_{rts} + L_{md} \quad (3.59)$$

Onde:

$$L_{fs} = -10 \log\left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 \quad (3.60)$$

λ é o comprimento de onda e R a distância entre transmissor e receptor

$$L_{rts} = -10 \log\left[\frac{\lambda}{2\pi^2 r} \left(\frac{1}{\phi} - \frac{1}{2\pi + \phi}\right)\right] \quad (3.61)$$

Em que:

$$\phi = \arctan\left(\frac{\Delta h_m}{x}\right) \quad (3.62)$$

$$r = \sqrt{(\Delta h_m)^2 + x^2} \quad (3.63)$$

Δh_m é a diferença de alturas entre o nível médio das edificações e a estação móvel.

w é a largura da rua.

x em geral é $w/2$.

Nos cálculos, em geral, supõe-se que a estação móvel tem 1,5 m de altura e cada andar das edificações tem 3 m de altura média.

Em (XIA; BERTONI, 1992)

$$L_{md} = -10 \log(Q^2) \quad (3.64)$$

Neste caso o valor de Q compreende três situações específicas. Descreve-se a seguir cada uma delas:

3.8.1 A antena da ERB numa altura próxima ao nível médio das edificações.

Após as simplificações feitas (XIA, 1997):

$$Q = \frac{1}{M} = \frac{d}{R} \quad (3.65)$$

Onde M é a quantidade de edificações entre o transmissor e receptor.

Logo a perda é dada por:

$$L = -10 \log\left(\frac{\lambda}{2\sqrt{2\pi}R}\right)^2 - 10 \log\left[\frac{\lambda}{2\pi^2r}\left(\frac{1}{\phi} - \frac{1}{2\pi + \phi}\right)^2\right] - 10 \log\left(\frac{d}{R}\right)^2 \quad (3.66)$$

Como a antena da estação rádio base está dentro de um "cluster" de edificações, um fator 2 foi incluído no termo do espaço livre para levar em consideração o espalhamento dos obstáculos em volta da estação base que reforçam o sinal na direção de propagação.

3.8.2 A antena da ERB bem acima do nível médio das edificações.

Nesta situação, o campo da onda plana por múltiplas difrações se reduz e o fator Q simplifica-se, resultando em (WALFISCH; BERTONI, 1988):

$$Q = 2,35\left(\frac{g_p}{M}\right)^{0,9} \approx 2,35\left(\frac{\Delta h_b}{R}\sqrt{\frac{d}{\lambda}}\right)^{0,9} \quad (3.67)$$

Assim, a perda total é dada por:

$$L = -\log\left[\left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2\right] - 10 \log\left[\frac{\lambda}{2\pi^2r}\left(\frac{1}{\phi} - \frac{1}{2\pi + \phi}\right)\right] - 10 \log\left[(2,35)^2\left(\frac{\Delta h_b}{R}\sqrt{\frac{d}{\lambda}}\right)^{1,8}\right] \quad (3.68)$$

3.8.3 A antena da ERB abaixo do nível médio das edificações.

Neste caso temos (WALFISCH; BERTONI, 1988):

$$Q = \left[\frac{d}{2\pi(R-d)}\right]^2 \frac{\lambda}{\sqrt{(\Delta h_b)^2 + d^2}} \left(\frac{1}{\phi} - \frac{1}{2\pi + \phi}\right)^2 \quad (3.69)$$

e

$$L = -10 \cdot \log\left(\frac{\lambda}{2\sqrt{2\pi}R}\right)^2 - 10 \log\left[\left(\frac{\lambda}{2\pi^2r}\right)\left(\frac{1}{\phi} - \frac{1}{2\pi + \phi}\right)\right] - 10 \log\left\{\left[\frac{d}{2\pi(R-d)}\right]^2 \left(\frac{\lambda}{\sqrt{(\Delta h_b)^2 + (d)^2}}\right)\left(\frac{1}{\phi} - \frac{1}{2\pi + \phi}\right)\right\} \quad (3.70)$$

3.9 Modelo de Bertoni adaptado

Em (CHUNG; BERTONI, 1993) mostra-se um modelo teórico de predição para a perda média na propagação entre a antena da estação base até a antena do assinante no nível do teto (rooftop) em áreas residenciais para frequências de 30 MHz até 3 GHz desenvolvido pelo próprio Bertoni.

As colunas de edificações nas áreas residenciais são modeladas como uma série de colunas de dielétricos de altura aleatória e uniformemente espaçadas.

A modelagem das edificações como sendo colunas de dielétrico é sugerido na mesma publicação acima. Alias, afora outra referência, o texto que segue tem a mesma fonte.

A perda por penetração nas edificações é de 1,7dB p/ 30 MHz; 7 dB p/ 300MHz e 18,7dB p/ 900MHz. No caso deste trabalho a frequência é na faixa de 2,4 GHz, o que naturalmente se afasta do limite do modelo em questão e como nestes casos os obstáculos absorvem grande parte da potência, não se consegue, segundo a sensibilidade do medidor utilizado detectar o nível de potência remanescente da trajetória. Evidentemente a comunicação se restringe à potência do sinal que se propaga acima dos obstáculos.

As variações nas alturas das edificações foram simuladas adotando-se alturas aleatórias para cada atenuação de fase, resultando em campos com variações aleatórias de acordo com as variações de altura. A partir disso foi obtido o valor médio, como também o seu desvio padrão para uma dada altura de antena receptora. A média foi utilizada para se obter a influência da distância e do ganho ou perda no nível do topo das edificações. O desvio padrão fornece o desvanecimento entre as localidades. A propagação é quando uma antena transmissora elevada emite para antenas receptoras, fixas e colocada nos topos dos telhados para serviços fixos de rede sem fio (CHUNG; BERTONI, 1993).

Para uma avaliação numérica do campo que chega nas antenas receptoras, as colunas de estruturas foram substituídas por uma serie de estruturas atenuantes de fase e alturas aleatórias e ainda com espaçamento uniforme, d . As alturas aleatórias das estruturas foram uniformemente distribuídas entre h_{max} e h_{min} , e com uma altura média h_{avg} . As condições escolhidas e considerações para aplicação do método são as seguintes:

- As alturas aleatórias uniformemente distribuídas entre 6 e 14 metros e espaçadas de $d = 50$ metros;
- Em altas frequências, a grande atenuação limita a influencia de fase nas ondas que atravessam as estruturas;
- São consideradas antenas receptoras fixas no nível do topo das edificações.

Quando estudamos propagação da onda plana sobre as edificações com altura uniforme na banda de UHF, foi encontrado uma dependência do campo com a frequência f_c , com o ângulo de incidência α , e com a distância de separação d . Essa dependência é dada por, g_p :

$$g_p = \sin \alpha \sqrt{\frac{d}{\lambda}} \quad (3.71)$$

Também foi encontrado que a amplitude do sinal sofre uma redução 3.24 devida a altura uniforme das edificações, Q_{uni} , e que pode ser aproximado pelo polinômio:

$$Q_{uni} = 3,50g_p - 3,327g_p^2 + 0,962g_p^3 \quad (3.72)$$

Em (CHUNG; BERTONI, 1993) foi observado que em todas as simulações as alturas das edificações foram consideradas uniformes e distribuídas entre 6 m e 14 m, e d foi considerado 50 m.

As edificações foram consideradas "absorventes" para frequências iguais ou superiores a 900 MHz.

Um novo polinômio foi encontrado nas simulações (CHUNG; BERTONI, 1993) para alturas aleatórias, Q_{Ran} entre 6m e 14 m.

$$Q_{Ran} = 2,616g_p - 2,313g_p^2 + 0,605g_p^3 \quad (3.73)$$

Medidas extensivas do nível do sinal foram feitas em 900 MHz e 1,8 GHz (CHUNG; BERTONI, 1993). O modelo de propagação sobre edificações obteve bons resultados e com uma boa precisão com as medidas realizadas.

Para antenas isotrópicas o "ganho no percurso" é dado por:

$$PG = \frac{P_{Rx}}{P_{Tx}} = \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 Q^2 \quad (3.74)$$

R = Distância rádio base e cliente

Para determinar Q , foi feito uso do ângulo local de incidência α para o raio direto do transmissor ao plano horizontal do receptor no nível do topo das edificações. Levando-se em consideração a curvatura da terra:

$$\alpha(R) = \arctan\left(\frac{h_{Tx}}{R}\right) - \frac{R}{2R_e} \quad (3.75)$$

Onde:

$R_e = 8490$ km, raio efetivo da terra, h_b é a altura da antena transmissora.

A equação acima não é válida para distâncias muito próximas ou além da linha do horizonte, $\alpha = 0$.

3.10 Modelo de Crosby

Em (CROSBY; HOPPER,) é examinando o efeito da variação aleatória na altura das edificações na perda de propagação por múltiplas difrações sobre as edificações no modelo de Walfisch-Bertoni. Nele a perda na propagação é dada pela soma das perdas de dois fatores: A perda por múltiplas difrações (L_{md}) e a perda por difração do último teto até o receptor (L_{rtr})

$$L = L_{md} + L_{rtr} \quad (3.76)$$

A análise original de Walfisch supondo que a distância entre o transmissor e o receptor é suficientemente grande para aproximar as ondas esféricas propagadas pela antena transmissora por ondas com ângulos de incidência $\alpha = \arctan(\frac{H}{R-x}) \approx \frac{H}{R}$, onde R é a distância entre o transmissor e o receptor e $x \ll R$ (no caso deste trabalho $x = 0$, distância entre o ultimo prédio e o receptor).

Após realizar várias simplificações e considerações Walfisch chega a uma aproximação $L_{md} \approx -20 \cdot \log Q$

Onde Q é o valor da amplitude do sinal e é dado por:

$$Q = 2,35g_p^{0,9} \quad \text{para } 0,01 < g_p < 0,4 \quad (3.77)$$

e

$$g_p = \sqrt{\alpha^2 \frac{d}{\lambda}} \quad (3.78)$$

Na realidade o modelo de Walfisch-Bertoni subestima a perda média na área em que possui grandes desvios na altura média das edificações.

Assim em (CROSBY; HOPPER,), é feita uma investigação na perda média por múltiplas difrações, analisando em detalhes a variação na altura das edificações. Isso é feito considerando um número muito maior de diferentes configurações na variação da altura das edificações, na separação média das construções e comprimento de onda. Foi suposto que a propagação

ocorre sobre n edificações igualmente espaçadas e modeladas como telas (screens) absorventes (CHUNG; BERTONI, 1993). A altura das telas, denotadas por $h_1, h_2, \dots, h_{n-1}$, são aleatoriamente distribuídas com média h_b e variância σ_k^2 .

Nas simulações realizadas (CROSBY; HOPPER,), para cada configuração, foram feitas avaliações sobre 100 telas, e a partir disso chegou-se às expressões aproximadas para a componente de perda média por múltiplas difrações com a incorporação da aleatoriedade na altura das estruturas.

Assim,

$$L_{md} = -20 \log Q \quad (3.79)$$

Em que:

$$Q = 3,50(g'_p) - 3,327(g'_p)^2 + 0,962(g'_p)^3 \quad (3.80)$$

Com o parâmetro adimensional (g'_p) dado por

$$(g_p)' = \frac{\alpha}{(1 + 4,88\gamma + 2,88\gamma^2)^{0,556}} \sqrt{\frac{d}{\lambda}} \quad (3.81)$$

$$\gamma = \frac{\sigma_h^2}{\lambda d} \quad (3.82)$$

$$\sigma_h = \frac{\Delta_h}{\sqrt{12}} \quad (3.83)$$

$\Delta h = 0, 1, 3, 5, 7$ e 9m ; Altura do transmissor entre 10 e 40 m ; $d = 50 \lambda$ até 1000λ .

3.11 Modelo de Kitao e Ichitsubo

Em (KITAO; ICHITSUBO, 2004) é proposto uma expressão para o calculo da predição das perdas na propagação. O método utilizado para se chegar à expressão foi à análise de múltiplas regressões para medidas feitas em uma área urbana.

As medidas foram feitas em três áreas urbanas do Japão: Yokohama, Kuramae, Chiyoda (KITAO; ICHITSUBO, 2004). A partir destas medidas foram feitas análises da relação das perdas

de propagação, L (dB), com a frequência f_c (GHz), com a distância R (m), com a altura da antena da estação rádio base h_b (m), e a largura da rua w (m) e sua inclinação ϕ ($^\circ$).

Utilizando estes cinco parâmetros chegou-se a

$$L = 43,9 \log R - 32,2 \log h_b + 20,41 \log f_c - 10,3 \log w + 13,4 \cos(1,37\phi - 76) + 52,5 \quad (3.84)$$

O erro médio quadrado (rms) utilizando a equação acima, em relação às medidas realizadas, ficaram em torno de 5,8 dB.

Devido à dificuldade na obtenção dos parâmetros ϕ e w , Kitao (KITAO; ICHITSUBO, 2004) sugere a retirada destes parâmetros da equação acima sem grandes perdas na precisão. O erro médio quadrado (rms) com a retirada de ϕ e w passaria de 5,8 dB para 6,7 dB.

A seguir mostra-se a equação sugerida e sua faixa de validade:

$$L = 42,7 \log R - 32,7 \log h_b + 20,7 \log f_c + 55,4 \quad (3.85)$$

Limites de abrangência para aplicação numérica.

- Distância = 100 -1000m
- Frequência = 0,4 - 8 GHz
- Altura da antena da ERB = 30 - 120 m
- Altura da antena da EM = 1,5 m
- Área Urbana

3.12 Modelo de Ibrahim - Parsons

Este modelo leva em consideração que a propagação em ambientes urbanos depende de fatores como o grau de urbanização, utilização do terreno e a variação de altura entre o terminal móvel e a ERB. Estas características empíricas foram extraídas de medidas realizadas na cidade de Londres, razão pela qual, esse modelo também é conhecido como "Modelo Londrino" (CAVALCANTE, 1999).

Em (IBRAHIM; PARSONS, 1983) e (PARSONS, 1992) Ibrahim e Parsons descrevem o ambiente urbano quantitativamente, determinando a dependência da perda de percurso com a distância e com a frequência de transmissão, utilizando os fatores já mencionados.

O melhor ajuste dos dados obtidos na cidade de Londres é mostrado na equação abaixo, ressaltando que a equação foi modificada devido à presença de um erro na equação original (CAVALCANTE, 1999).

$$L = -20 \log(0,7h_b) - 8 \log(h_m) + \frac{f_c}{40} + 26 \log\left(\frac{f_c}{40}\right) - 86 \log\left(\frac{f_c + 100}{156}\right) \\ + [40 + 14,15 \log\left(\frac{f_c + 100}{156}\right)] \log(1000R) + 0,256(62,4 - 2,2R) \\ - \left(\frac{0,37(-7,475R^2 + 85,225R - 91,55)}{7}\right) \quad (3.86)$$

Onde:

f_c = Frequência de operação na faixa em MHz

R = Distância ERB-EM em km

h_b = Altura da estação rádio base sobre o nível da rua, entre 4 e 50 metros.

h_m = Altura da antena da estação móvel em metros.

3.13 Modelo de Dois Raios e a 1ª Zona de Fresnel

Nesta seção é feita uma breve revisão da teoria do modelo de dois raios e da 1ª Zona de Fresnel (CAVALCANTE, 1999) (VALLE, 2000), por causa da importância destes no modelamento dos enlaces entre as cidades.

- *Modelo de dois Raios*

Um caso de propagação sobre superfície refletora é mostrado na Figura 3.9. O nível de sinal total na antena receptora é formado por duas componentes: a onda direta e a onda refletida na superfície. A atenuação nestes percursos individuais é dada pela equação de espaço livre eq. 3.21, e o nível de potência resultante irá depender da diferença no comprimento dos percursos e do coeficiente de reflexão da superfície.

Uma situação de interesse nas comunicações móveis acontece quando as alturas das antenas são pequenas em relação à distância entre elas. Neste caso, em relação a atenuação, assume-se que a diferença do comprimento do percurso é desprezível. No entanto, em relação a fase das ondas recebidas, esta diferença não pode ser desprezada. Para $h_1, h_2 \gg d$, o coeficiente de reflexão Γ , que depende das constantes do solo (permissividade e condutividade) pode ser considerado igual a -1.

O modelo de dois raios é baseado no diagrama da Figura 3.9 e a potência do sinal recebido pode ser obtido usando a equação a abaixo:

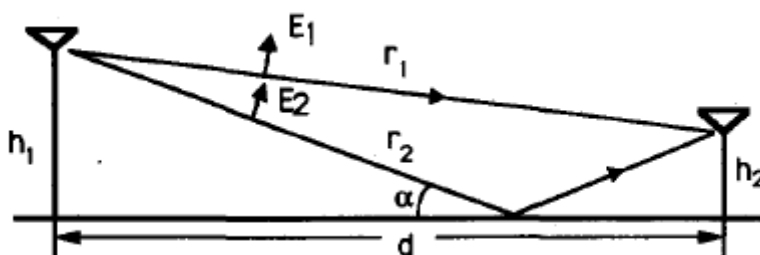


Figura 3.9: Modelo de dois raios

$$L_p = -20 \log(h_1) - 20 \log(h_2) + 40 \log(d) \quad (3.87)$$

Para se obter a equação 3.87 considerou-se $\Gamma = -1$, $\frac{h_1+h_2}{d} \ll 1$ e após algumas simplificações (VÁSQUEZ, 1996) (ALENCAR, 2001) as perdas no modelo de dois raios é expressa pela equação acima em sua forma simplificada.

- *Primeira Zona de Fresnel*

Quando o percurso de propagação tem a primeira zona de Fresnel livre, a atenuação do sinal se dá basicamente pela dispersão da frente de ondas. Porém, quando a primeira zona de Fresnel começa a ser obstruída, ocorre uma queda acentuada devido à alta concentração de energia de "rádio" dentro desta região. Por isso a sua importância na descrição no enlaces de comunicações. Abaixo é descrito de forma resumida a teoria básica da 1ª Zona de Fresnel.

O raio da 1ª zona de Fresnel pode ser calculado através da expressão:

$$R = 17,3 \sqrt{\frac{d_1 d_2}{f d}} \quad (3.88)$$

Onde:

R é o raio da primeira zona de Fresnel (m)

d_1 é a distância do ponto considerado a T_x ou R_x (km)

d_2 é igual a $d - d_1$

f é a frequência de trabalho (GHz)

d é a distância entre T_x e R_x (km)

A expressão acima permite que se calcule a altura necessária para liberação da zona de Fresnel (TELEBRAS, 1982) e na Figura a seguir, esboça-se o elipsóide de Fresnel entre o T_x e R_x .

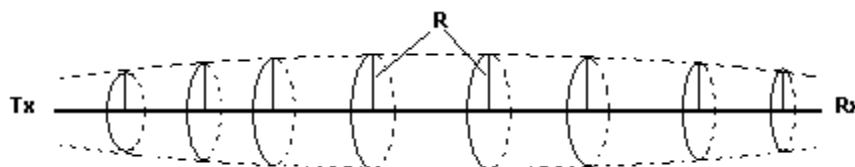


Figura 3.10: Região do Elipsóide de Fresnel

Como a 1ª zona de Fresnel é a que mais contribui para o campo recebido, deve ser preservada de qualquer obstrução. Essa condição, porém nem sempre pode ser atendida na prática, e como uma pequena obstrução não afeta muito a intensidade do sinal, define-se como folga, a situação em que o raio da 1ª zona de Fresnel é obstruído, no local do obstáculo, em no máximo 40 %. Qualquer obstrução superior a essa, caracteriza a situação como obstrução. Veja cada situação possível na figura a seguir Figura 3.11.

Os pontos críticos são os pontos do relevo que tocam ou ultrapassam a altura correspondente a 0,6 do 1º elipsóide de Fresnel. Para se caracterizar melhor, se expressa a distância entre a superfície e a trajetória pela variável H e por R , o raio da 1ª zona de Fresnel no mesmo ponto. A variável H é positiva se a superfície está abaixo da trajetória e negativa se a mesma estiver acima da trajetória, bloqueando-a.

Então, para cada ponto crítico calcula-se a relação H/R . Se a relação H/R for maior igual a 0,6, diz-se que há folga no percurso, enquanto se $H/R < 0,6$ é classificada como existe uma obstrução.

Em consequência dos resultados acima, devem-se considerar em particular todos os pontos do relevo, para os quais a relação $H/R < 0,6$. Esses são os pontos críticos.

Os obstáculos são classificados em dois tipos:

1. O obstáculo "gume-de-faca" é um obstáculo sem espessura composto de material não-reflexivo e pontiagudo, daí o seu nome. Este é um obstáculo teórico, que no entanto simula muito bem a situação real de uma montanha natural quando a sua espessura é menor que $\lambda/10$. Essa situação não é freqüente na prática, principalmente na faixa de VHF e acima, onde o comprimento de onda é muito pequeno.

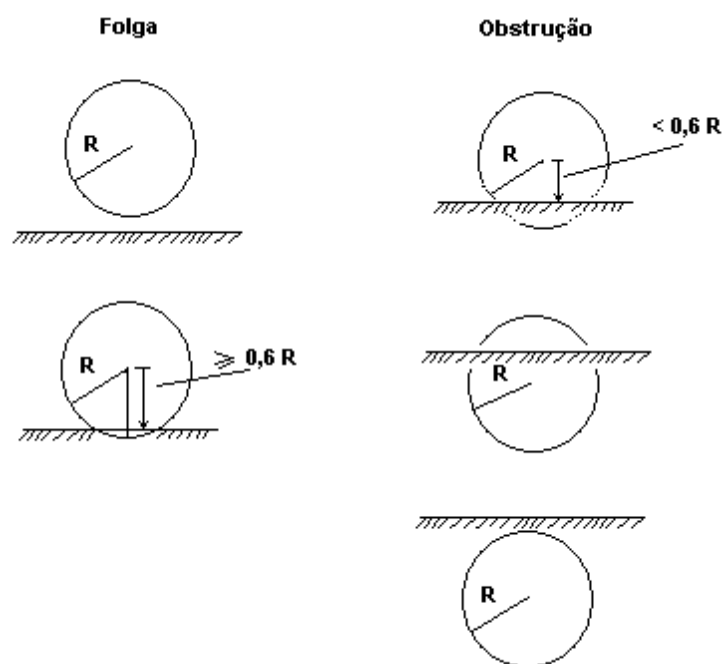


Figura 3.11: Situações de Folga e Obstrução da 1ª Zona de Fresnel

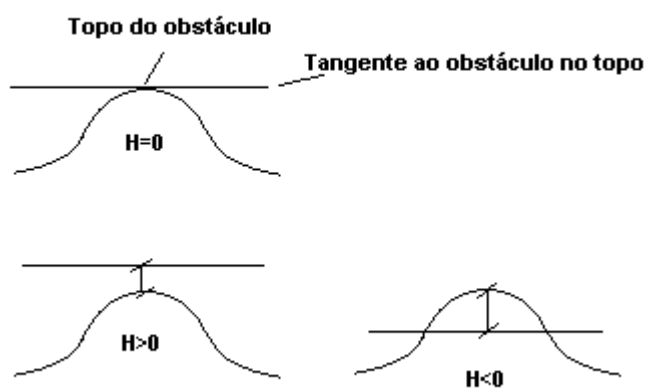


Figura 3.12: Variações do parâmetro H

2. Bordos arredondados é o obstáculo natural (morro,colina), ou pode-se definir também como aquele cuja espessura é maior que $\lambda/10$. Na faixa de VHF e acima, praticamente todos os obstáculos naturais são de bordos arredondados.

Para se calcular a atenuação causada por obstáculos, faz-se uso do gráfico, Anexo G, para o qual é necessário se colocar os parâmetros H/R e α . O termo H/R já foi definido e é a relação entre a folga ou obstrução no local do obstáculo e o raio da 1ª zona de Fresnel no mesmo ponto. O parâmetro α é dado por:

$$\alpha = \frac{\lambda^{\frac{2}{3}} r^{\frac{1}{3}}}{R} \quad (3.89)$$

Onde:

λ é o comprimento de onda.

r é o raio de curvatura no topo do obstáculo.

R é o raio da 1ª zona de Fresnel no local do topo do obstáculo.

O calculo do raio de curvatura pode ser feito tomando-se dois ou mais pontos a partir do topo do obstáculo e em ambas as direções e medindo-se os valores X_i e Y_i mostrados na figura a seguir. A seguir calcula-se

$$r_i = \frac{1}{2} \frac{(X_i)^2}{Y_i} \quad (3.90)$$

e finalmente o raio de curvatura é dado pela média aritmética dos r_i calculados:

$$r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i \quad (3.91)$$

Vê-se, Anexo G, que o obstáculo "gume-de-faca" não tendo espessura, terá raio de curvatura igual a zero, e em conseqüência $\alpha = 0$.

Observa-se no gráfico que esse obstáculo é o que apresenta a menor atenuação, ou, dito de outra forma, quanto maior o raio de curvatura no topo do obstáculo maior a atenuação que o mesmo causa na propagação das ondas.

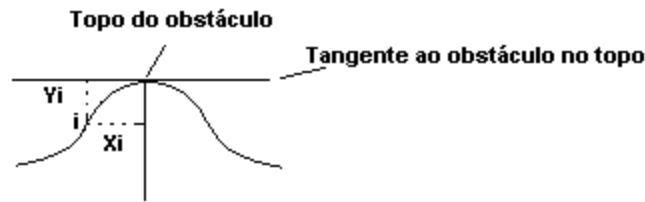


Figura 3.13: Cálculo do raio do obstáculo

3.14 Modelo de Egli

Após uma série de medidas em terrenos irregulares e em frequências entre 90 e 1000 MHz, Egli (EGLI, 1957) propõe um modelo empírico que segue uma dependência com o inverso da quarta potência da distância entre o transmissor e receptor. Este modelo usa a equação de terra plana, com um fator de correção β . Este fator se deve a observações de que existem variações em torno do valor gerado pelo modelo de terra plana e que elas dependem da frequência (CAVALCANTE, 1999) (VÁSQUEZ, 1996).

A perda mediana do modelo de Egli fica sendo:

$$L = G_b G_m \left(\frac{h_b h_m}{d^2} \right)^2 \beta \quad (3.92)$$

com

$$\beta = \left(\frac{40}{f} \right)^2 \quad (3.93)$$

Onde:

G_b , G_m são os ganhos das antenas base e móvel;

h_b , h_m são as alturas, em metros, das antenas base e móvel;

d é a distância, em metros, entre transmissor e receptor;

f é a frequência em MHz.

3.15 Modelo de Blomquist-Ladell

Este modelo (BLOMQUIST; LADELL, 1974), é baseado no modelo JRC (Joint Radio Committee), e considera os mesmos tipos de perdas consideradas em (EDWARDS; DURKIN, 1969), porém

combinados de outra maneira, de modo a se obter uma transição mais suave entre pontos onde a previsão se baseia em perdas no espaço livre (L_o) e aqueles em que se usa a perda de terra plana (L_p) (CAVALCANTE, 1999).

A equação básica para a perda no percurso em dB é:

$$L = L_o + [(L'_p - L_o)^2 + L_D^2]^{\frac{1}{2}} \quad (3.94)$$

Onde:

L_D é a perda devido à difração que ocorre no percurso.

L'_p é a perda de terra plana modificada devido aos efeitos da curvatura da terra e da troposfera.

Quando L_D tende a zero, ou seja, um percurso não obstruído, a perda total é dada por:

$$L = L'_p$$

3.16 Modelo de Lee

É descrito a seguir o modelo de Lee (LEE., 1989) (LEE; MILLER, 1998), ponto-a-ponto, de propagação. Para isso são necessárias três etapas:

1. A primeira etapa é a criação de uma condição dita padrão. Para gerar a condição padrão e fornecer fatores de correção, usam-se as condições mostradas no lado esquerdo e os fatores de correção do lado direito da tabela a seguir 3.1.

Condição Padrão	Fatores de Correção
ERB	
Potência transmitida: $P_t = 10$ W	$\alpha_1 = 10. \log(P_t^*/10)$
Altura da antena: $h_1 = 30$ m	$\alpha_2 = 20. \log(h_1^*/h_1)$
Ganho da antena: $g_t = 6$ dB	$\alpha_3 = g_t^* - 6$
EM	
Altura da antena: $h_2 = 3$ m	$\alpha_4 = 20. \log(h_2^*/h_2)$
Ganho da antena: $g_m = 0$ dB	$\alpha_5 = g_m^*$

Tabela 3.1: Condições padrão e fatores de correção (* parâmetros da nova condição)

2. A segunda etapa é a obtenção da previsão ponto-área. Na previsão ponto-área são considerados dois parâmetros que representam um determinado modelo de previsão, que são:

A perda média de transmissão para uma distância padrão de 1 km (ou de 1 milha) da estação transmissora (L_0), e a inclinação da curva da perda de percurso (γ). Na Figura 3.14, a seguir, estes parâmetros são apresentados para vários ambientes.

As curvas apresentadas são distintas para diferentes regiões. Na previsão ponto-área, todas as áreas são consideradas planas mesmo que os dados possam ser obtidos em áreas não planas. A razão é que a previsão ponto-área é um processo médio (LEE., 1989). O desvio padrão do valor médio indica o grau de irregularidade do terreno.

Portanto, as diferenças nas curvas de previsão se devem às diferentes condições do terreno. Quando a área a ser estudada apresenta características parecidas com algum dos ambientes apresentados na figura anterior, então se utilizam os mesmos parâmetros. Caso contrário, haverá a necessidade de se determinar os parâmetros experimentais através de medições.

3. A terceira e última etapa é a obtenção da previsão ponto-a-ponto usando a previsão ponto-área como referência. Na previsão ponto-a-ponto, leva-se em consideração o relevo da região de interesse. Sendo assim podem ocorrer dois casos: Percurso não obstruído e obstruído.

No percurso não obstruído, o caminho direto da estação base à unidade móvel não está obstruído pelo perfil do terreno. Neste caso, dois termos devem ser identificados:

- O caminho direto não obstruído, que se refere ao caminho que não é obstruído pelo perfil do terreno;
- E o caminho em linha de visada, onde o trajeto não é obstruído nem pelo terreno nem pelas edificações.

No ambiente móvel celular, dificilmente ocorre a linha de visada. Portanto, usam-se as condições de percurso direto que não são obstruídas pelo terreno. Sob estas condições, o ganho de altura da antena pode ser calculado para todas as posições onde a unidade móvel estiver, como pode ser observado na Figura 3.15.

O método para calcular o ganho da altura da antena consiste em achar o ponto de reflexão ligando a imagem da antena móvel à antena base. Em seguida, estender o plano de reflexão até a localidade da antena base e medir a altura efetiva da antena no ponto onde o plano de reflexão e a antena base se encontram. Por último se calcula o ganho ΔG da altura antena usando a equação abaixo.

$$\Delta G = 20 \cdot \log \frac{h_e}{h} \quad (3.95)$$

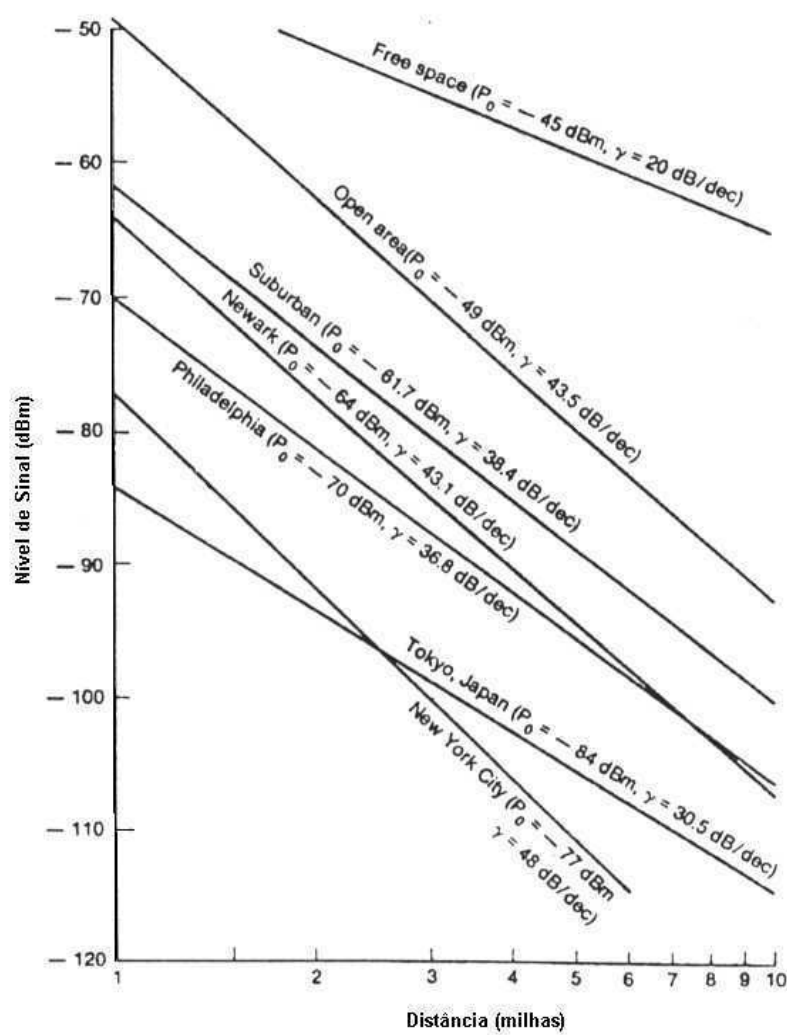


Figura 3.14: Parâmetros do modelo de Lee

Onde:

h_e é a altura efetiva da antena base e h é a altura real da antena base.

Observa-se que ΔG muda a medida que a unidade móvel se desloca, já que a altura efetiva h_e varia e a altura real h permanece fixa.

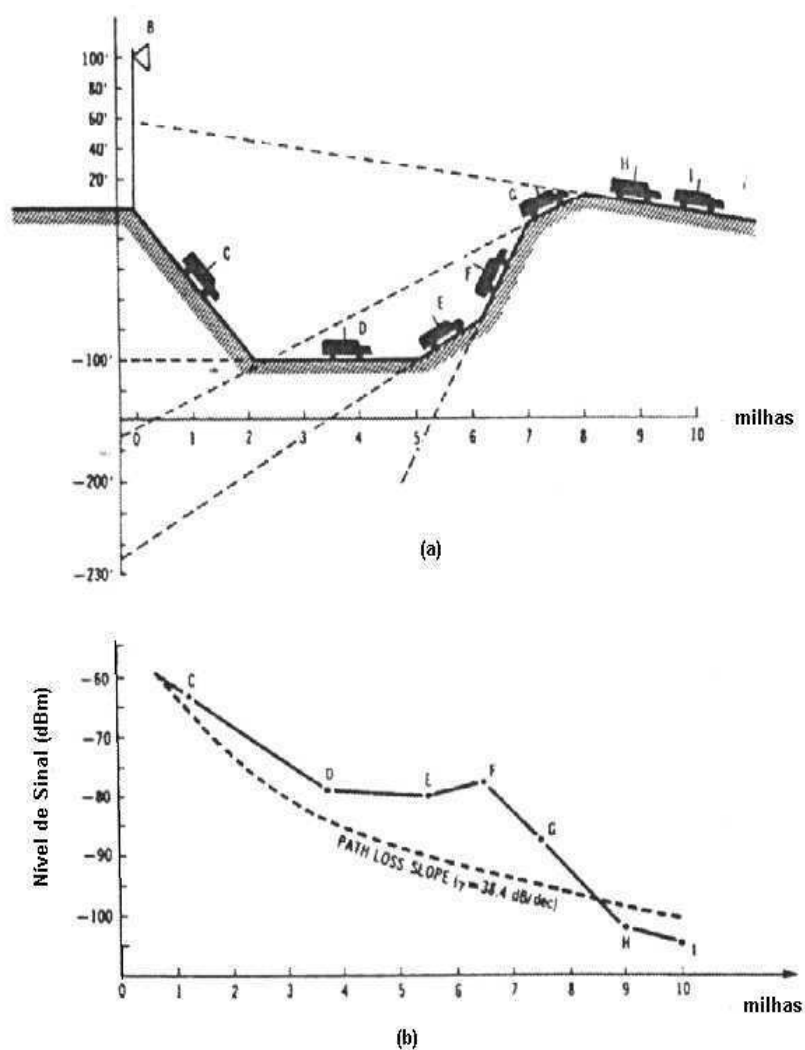


Figura 3.15: Parâmetros do modelo de Lee

Se não forem levadas em consideração as mudanças do ganho de altura de antena devido ao perfil do terreno, a curva de perda no percurso terá um desvio padrão de 8 dB em relação as medidas. Enquanto que, considerando ΔG , haverá um desvio padrão de 2 a 3 dB. Isto pode ser observado na Figura (3.15b). Considerando uma área suburbana ($\gamma = 38,4$ dB/dec) é possível plotar a curva de queda no percurso. A esta curva soma-se o fator de correção ΔG devido à altura efetiva em cada ponto do terreno. Pode-se, assim, visualizar a diferença entre a previsão ponto-área e a previsão ponto-a-ponto.

No percurso obstruído, o caminho direto entre a unidade base e móvel é obstruído pelo perfil do terreno. Trata-se este caso em dois passos: aplica-se a previsão ponto área e, depois, obtém-se o fator de perda por difração que é somado ao primeiro resultado.

A previsão ponto-área é feita da mesma maneira que no caso sem obstrução, sem levar em conta o relevo e usando os fatores de correção para uma situação particular. O fator de perda por difração pode ser obtido tratando-se o obstáculo como gume de faca ou de bordos arredondados.

O modelo apresenta a seguinte fórmula geral para a potência recebida em dBm:

- Equação para percurso não obstruído:

$$P = P_0 + \gamma \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + 20 \log\left(\frac{h_e}{h}\right) + \alpha \quad (3.96)$$

- Equação para percurso obstruído

$$P = P_0 + \gamma \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + L + \alpha \quad (3.97)$$

Onde:

P = Potência recebida a uma distância r do transmissor em dB_m

P_0 = Potência recebida a uma distância d_0 do transmissor.

γ = Inclinação da perda de percurso em dB/séc;

d = Distância entre transmissor e receptor em km (milha);

$d_0 = 1$ km (1 milha);

h_e = Altura efetiva da antena base em metros;

h = Altura real da antena base em metros;

α = Fator de correção da condição padrão, tabela 3.1, em dB;

L = Perda por difração em dB.

Neste capítulo procurou-se ilustrar de forma resumida alguns dos principais modelos destinados ao cálculo da predição das perdas de propagação em ambientes urbanos. Todos buscam uma descrição do ambiente de propagação e são focados, principalmente, na utilização de serviços de telefonia móvel celular (CAVALCANTE, 1999). Após essa descrição, cada um desses modelos será utilizado no caso específico da propagação da rede de computadores sem fio em um ambiente urbano. A falta de um modelo específico para a situação analisada. Essa restrição será, inicialmente, ignorada e ao final do trabalho, de posse dos resultados comparativos, é comentado a influência dessa consideração sobre os erros cometidos. Outro fator importante é que, os modelos são abordados, aqui, da maneira na qual originalmente foram apresentados em estudos e publicações internacionalmente reconhecidas. Após isso, cada modelo, quando possível, será ajustado para as condições encontradas neste trabalho.

Capítulo 4

Ajustes para Medições

Durante o desenvolvimento deste trabalho foram montadas duas configurações para ajustes de medidas. Na primeira configuração foi montado um sistema de transmissão e recepção para medições a serem realizadas em um ambiente de laboratório. Essa montagem serviu também para teste de confiabilidade do sistema. Posteriormente realizou-se a segunda montagem, ainda em laboratório, mas para aplicação posterior em ambiente externo. Os esquemas citados foram montados no LEMA - Laboratório de Eletromagnetismo e Microondas Aplicados do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande (LEMA-DEE-UFCG). Os equipamentos utilizados serão descritos a seguir.

4.1 Sistema de referência

Na Figura 4.1 tem-se um sistema de aquisição de medidas de sinal (potência) em um enlace de comunicação, cujos resultados servirão como uma referência para comparações posteriores. O sistema é composto de:

- Transmissor e sua antena (equipamento a ser usado em campo);
- Antena receptora e analisador de espectro;
- Computador portátil;
- Software de interface para o analisador de espectro.

4.1.1 O transmissor e sua antena

O transmissor é composto de um equipamento comercial facilmente encontrado no mercado. Popularmente conhecido por AP (Ponto de acesso, do inglês Access Point) serve para permitir

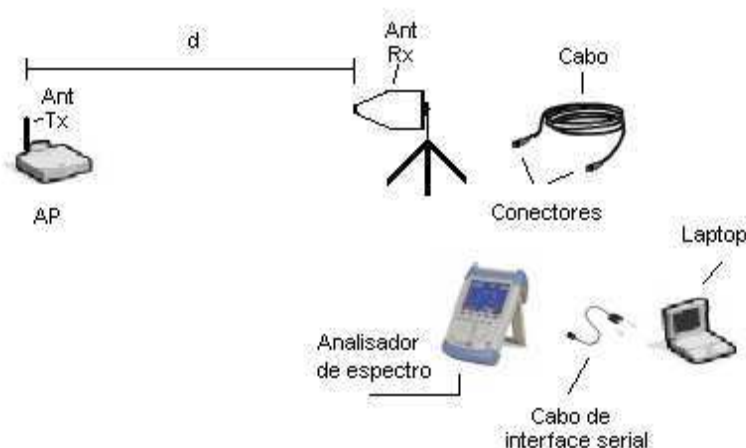


Figura 4.1: Montagem do sistema de referência

o acesso às estações clientes, segundo descrito no Capítulo 2, e mostrado na Figura 2.3. O modelo utilizado foi o da linha de fabricação da D-link (D-LINK, 2005), que funciona na faixa de frequência ISM de 2412 a 2462 MHz e utiliza a técnica de espalhamento espectral por seqüência direta (DSSS) de acordo com os padrões do IEEE 802.11b (IEEE, 1999a) (IEEE, 1999b) e segundo as normas dos órgãos reguladores (ANATEL, 2006a) (FCC, 2005). A antena utilizada foi a omnidirecional de 2,5 dB, com conector SMA reverso destacável, disponível com o próprio equipamento. A potência de saída pode ser ajustada em vários níveis (10 dBm, 12 dBm, 15 dBm e 17 dBm). Foi escolhida a potência de 17 dBm. A taxa de transmissão na qual o AP trabalha varia entre os valores 1; 2; 5,5 e 11 Mbps. Estes valores variam de forma aleatória e de acordo com o ambiente de propagação e são ajustados de forma automática pelo próprio equipamento de forma a que melhor se adaptem às condições presentes no momento da transmissão. Os demais parâmetros de configuração do equipamento que podem ser acessados e modificados via navegador de páginas WEB, pela porta de rede Ethernet, foram deixados com os valores padrões do próprio equipamento.

4.1.2 Antena receptora, cabo de conexão e analisador de espectro

No laboratório, colocamos o AP de teste ligado e posicionado a uma distância de 1,80 metros da antena receptora como é ilustrado na Figura 4.1. Utilizando a equação apresentada em (VALLE, 2000) e mostrada abaixo, temos:

$$d > \frac{2 \cdot D_{ant}^2}{\lambda} \quad (4.1)$$

Onde:

d é a distância entre a antena transmissora e a antena receptora.

D_{ant} é a maior dimensão da antena.

λ é o comprimento de onda.

Esta equação mostra a distância mínima aproximada para trabalharmos na região de campos distantes.

Logo, para o canal 1, se a frequência central é 2412 MHz e c é a velocidade da luz no vácuo, o valor de λ é:

$$\lambda = \frac{c}{f} = 0,124378m \quad (4.2)$$

$$D_{ant} = 0,087m \quad (4.3)$$

Combinando os resultados 4.2 e 4.3 na equação 4.1 obtemos:

$$d > 0,1217m \quad (4.4)$$

Assim, a distância que utilizamos foi de 1,8 metros, bem maior que 0,1217 m, o que nos garante que as medidas realizadas no laboratório estão na região de campos distantes (região de Fraunhoufer). Essa distância entre transmissor e receptor é ainda suficiente para garantir a região de campos distantes mesmo quando utilizamos o canal 11, $f = 2462$ MHz.

A antena utilizada foi o modelo HL040, Figura 4.2 (ROHDE, 2005), e suas características estão na Tabela 4.1. Essa antena foi ligada ao analisador de espectro R&S FSH3 (ROHDE, 2005), Figura 4.2, através de um cabo de 1,8 metros e os dados foram coletados utilizando o software FSH View 8.0 (ROHDE, 2005). Os dados foram coletados e gravados em um computador portátil (IBM, 2005).

4.1.3 Aquisição dos dados

O analisador de espectro foi ajustado para cada faixa de frequência utilizada (canais de 1 a 11). Após 5 minutos, a tela do analisador de espectro mostrou um gráfico reproduzido na Figura 4.4. Utilizaram-se os recursos do software FSH View® 8.0 para realizar a captura das informações e salvá-las no *notebook* (IBM, 2005). No Anexo A temos cada uma das telas obtidas, com as informações, para cada um dos canais, 2 a 11, utilizados pela tecnologia *Wi-Fi*.



Figura 4.2: Antena Receptora e o suporte utilizados (ROHDE, 2005)

HL040 - Log-Periodic Dipole Antenna	
Faixa de Frequência	400 a 3000 MHz
Polarização	linear
Impedância	50 Ω
VSWR	<2.5, typ. <2.0
Potência máx. de entrada	150 a 50 W CW
Ganho	5 a 7 dBi
Razão Frente-Costa	>10 dB (400 a 450 MHz) >15 dB (450 a 3000 MHz)
Polarização de Isolação	>20 dB
Conector	N fêmea
Temperatura de operação	-20 a +70°C
Máx. resistência ao vento sem gelo com 1/4 de gelo	200 km/h 118 km/h
Dimensões (H x W x L)	130 mm x 302 mm x 680 mm
Peso	2.8 kg

Tabela 4.1: Características da antena receptora (ROHDE, 2005)



Figura 4.3: Analisador de espectro R&S FSH3 (ROHDE, 2005)

Como previsto, nos modelos teóricos e nas normas dos órgãos reguladores, o espectro de frequência "formado" ao longo do tempo tem aspecto de um "monte" devido à técnica de espalhamento espectral, em que o sinal transmitido ocupa apenas uma pequena parcela do espectro disponível por um curto período de tempo e seu nível de potência é máximo na parte central do canal e menor nas extremidades da banda utilizada. As Figuras 4.4 e A.1 até A.10 ilustram a sobreposição de diversos "impulsos" no espectro, conforme a descrição exibida na Figura 4.5. Após os 5 minutos de sobreposição, na "faixa" de espectro observado, os diversos impulsos descrevem as curvas ilustradas. Na Figura 4.4, observamos que o nível de potência máximo médio recebido ficou próximo de -45 dBm para o canal 1 (2412MHz). Os demais níveis máximos de potência obtidos para cada canal se mantiveram dentro da faixa de potência entre -40 e -45 dBm. As Figuras de A.1 até A.10 ilustram os resultados obtidos.

O formato da Figura 4.4 e suas congêneres (Anexo A) são obtidos da sobreposição de diversos sinais durante o tempo de observação, aproximadamente 5 minutos, utilizando o analisador de espectro. A Figura 4.5 ilustra este processo.

Na Figura (4.5a), vemos um "impulso" na frequência, isso sugere, pelas regras da transformada de Fourier (ALENCAR, 2001), que no tempo teremos um espalhamento deste impulso, por toda "faixa" disponível. A amplitude será, também pelas regras da transformada, bem menor. A Figura 4.6 ilustra como ficaria o impulso da Figura (4.5a) no domínio do tempo.

4.2 Sistema proposto para uso externo

Após a utilização do analisador de espectro, continuou-se a realização das medições utilizando agora o sistema de aquisição de dados proposto para uso externo. Este sistema consiste da substituição do analisador de espectro por um conjunto de software e hardware para aquisição dos níveis máximos de potência (em dBm). Para validar as medidas externas, foram repetidas as medições, nas mesmas condições que as realizadas com o analisador de espectro, Figura 4.1.

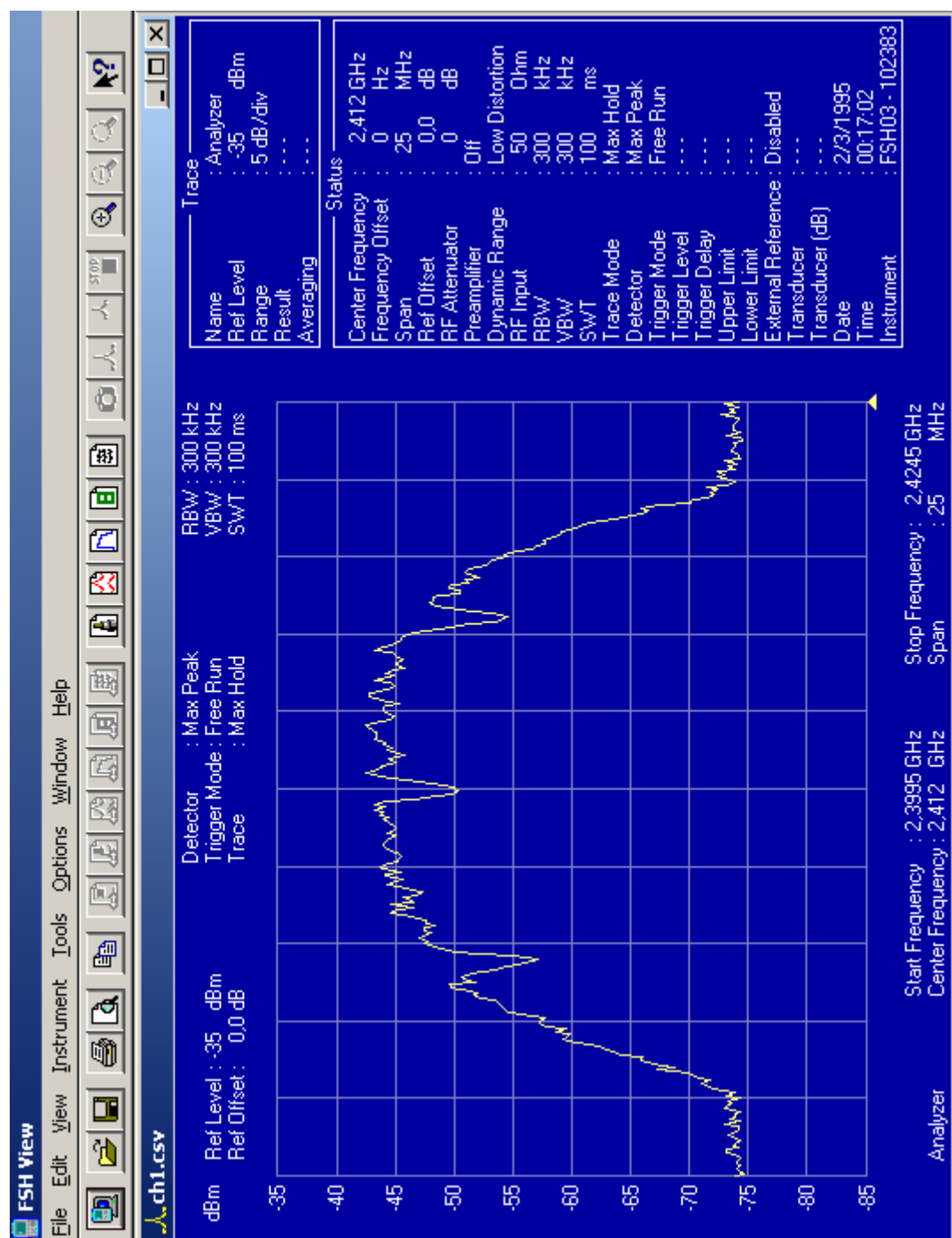


Figura 4.4: Tela capturada pelo FSH View - Espectro de Frequência para o canal 1 (2412 MHz)

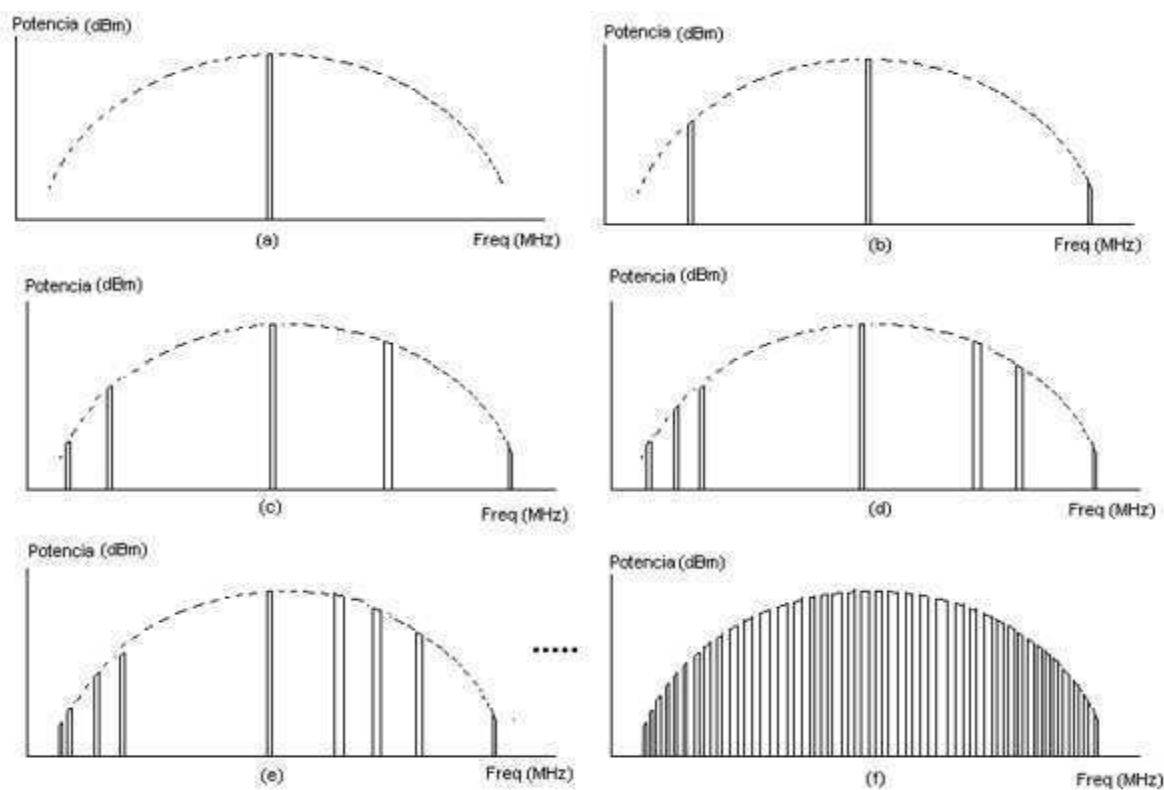


Figura 4.5: Processo de sobreposição para obtenção das curvas mostradas pelo analisador de espectro

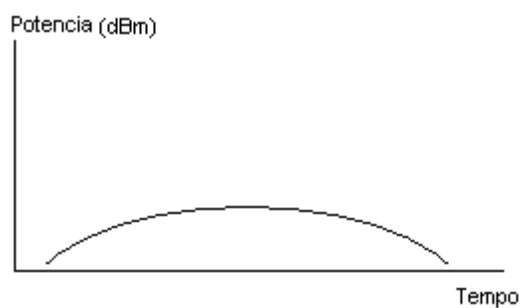


Figura 4.6: Espalhamento do sinal no tempo

Porém, esse sem o software que foi substituído por outro (NETSTUMBLER, 2005), sugerido em (GAST, 2005) como uma das ferramentas que podem auxiliar na caracterização das redes sem fio. Utilizou-se para isso o cartão PCMCIA com características apresentadas na Tabela 4.2.

Na Figura 4.7, verificamos que em relação ao sistema de medidas referenciais, neste caso os itens (AP, Antena transmissora, antena receptora e cabo da antena receptora) bem como as configurações dos equipamentos foram mantidas constantes.

Cartão PCMCIA	
Faixa de Frequência	2400 a 2483,5 MHz
Técnica de Modulação	Seqüência Direta por Espalhamento Espectral (CCK, DQPSK, DBPSK)
Tipo de Acesso ao Meio	CSMA/CA (Collision Avoidance) with ACK
Bit Error Rate (BER)	Melhor que 10^{-5}
Potência de Saída	15 dBm +/- 2 dBm
Ganho	2,5 dB
Sensibilidade na recepção dBm	- 94 dBm / 1 Mbps - 91 dBm / 2 Mbps - 87 dBm / 5,5 Mbps - 82 dBm / 11 Mbps
Potência Consumo do cartão	Doze Mode - 9 mA Received Mode - 185 mA Transmit Mode - 285 mA
Conector	PCMCIA CARD Slot Type I
Temperatura de operação	0 a +55°C
Dimensões (H x W x L)	117,8 mm x 53,95 mm x 8,7 mm
Peso	55 g

Tabela 4.2: Características do cartão PCMCIA (PROXIM, 2006)

Repetimos as mesmas medidas feitas com o analisador de espectro. Os resultados dos níveis de potência obtidos para cada canal utilizando nessa nova configuração são ilustrados nas Figuras 4.8 e B.1 até B.10 no Anexo B. Na Figura 4.8, em vermelho, observamos o nível de ruído presente durante a realização das medidas. Em verde, temos o nível de sinal recebido. A relação Sinal - Ruído é visualmente fácil de identificar pela diferença entre a potência do sinal recebido, em verde, e o ruído, em vermelho.

Observando as Figuras 4.5 e 4.6 percebemos que para um receptor não "autorizado", ou seja,

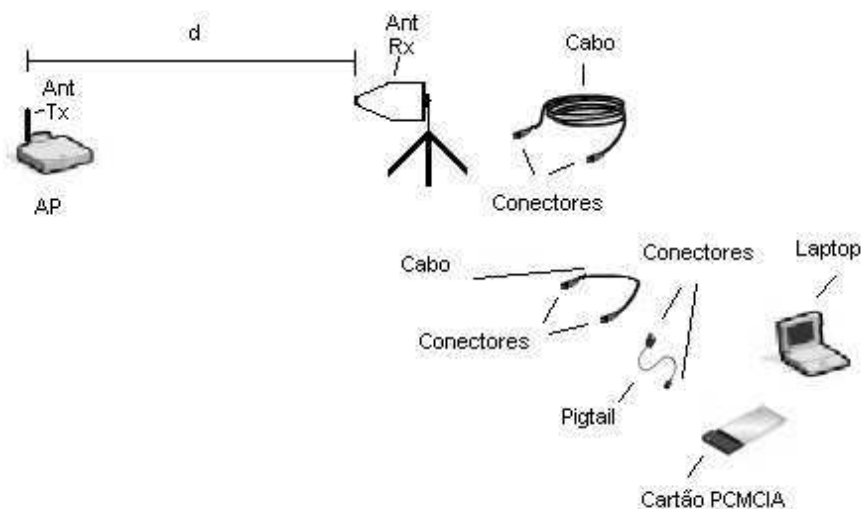


Figura 4.7: Montagem do sistema proposto para medidas externas

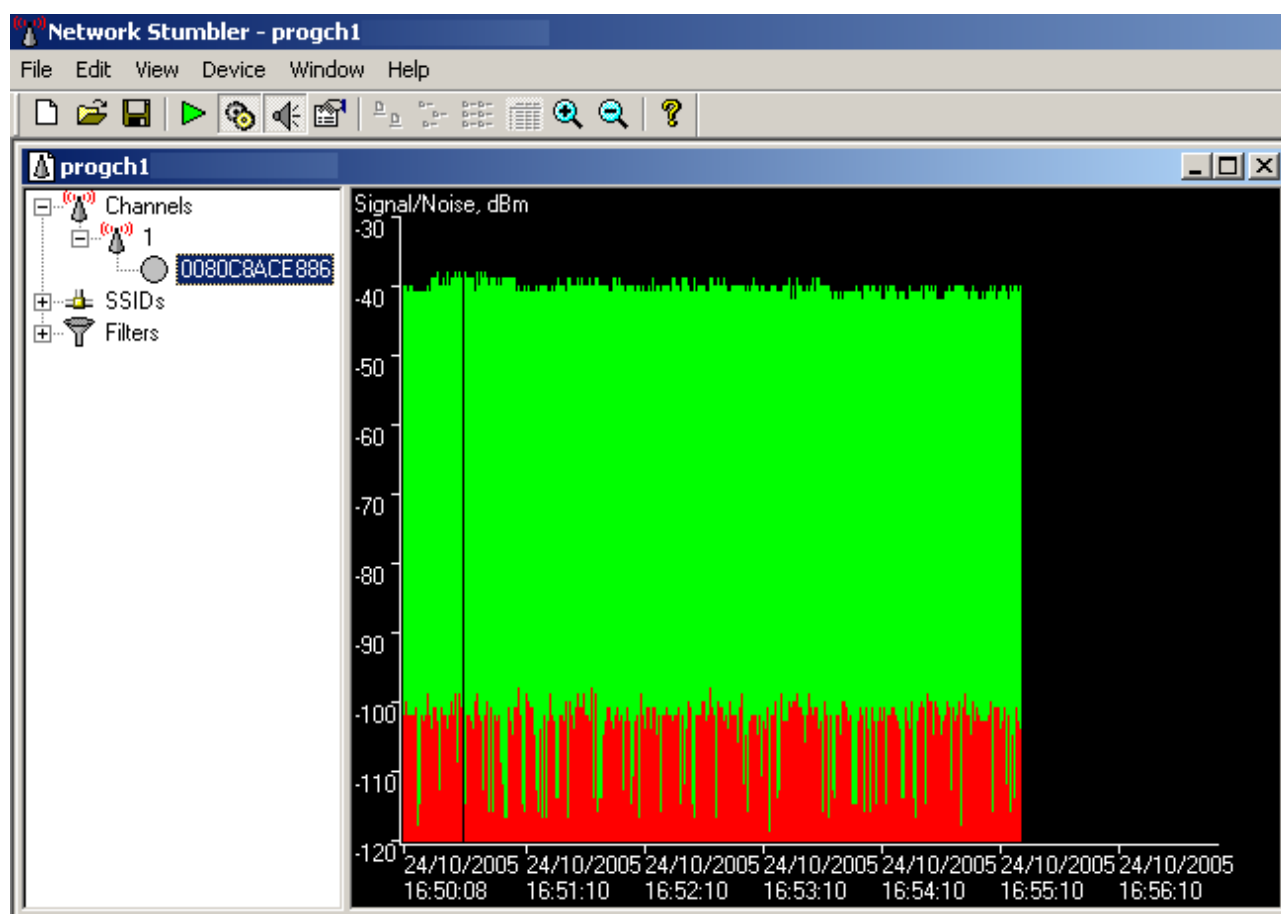


Figura 4.8: Resultado obtido utilizando a montagem do sistema proposto para o canal 1 (2412 MHz)

sem o código que gerou o espalhamento, o sinal seria confundido com ruído. Essa característica foi o que mais chamou atenção nesta técnica de modulação, fazendo com que a utilização do espalhamento espectral por sequência direta (DSSS) ou por salto em frequência (FHSS) fossem restritas as aplicações militares.

Hoje isso é bem diferente e o espalhamento espectral esta sendo utilizado em vários dispositivos comerciais e residenciais. A placa de rede sem fio utilizada neste trabalho é um destes dispositivos.

O processo, descrito acima, ilustra de forma simples como a placa de rede sem fio utilizada neste trabalho funciona.

As Figuras obtidas, 4.8 e B.1 até B.10, ilustra os resultados para cada um dos canais possíveis.

As discrepâncias entre os níveis de potência mostrado na Figura 4.4 e na Figura 4.8, se devem ao fato que o cartão PCMCIA possui uma antena com ganho de 2,5 dB, Tabela 4.2. Esse ganho adicional se reflete na obtenção de níveis um pouco mais altos, Figura 4.8, que os obtidos usando o analisador de espectro, Figura 4.4. As extremidades apresentam níveis de potência menor que na região central, para minimizar a sobreposição com os canais vizinhos. Para compensar isso, o transmissor envia mais de um impulso, com uma amplitude menor, em pequenos intervalos de tempo, de forma que a soma das amplitudes dos impulsos seja semelhante à situação quando se transmite um impulso na região central.

Os níveis de potência apresentados nas Figuras 4.8 e B.1 até B.10, já são níveis de potência disponíveis para transmissão e possuem um ganho adicional, como já citado, devido a antena presente no cartão PCMCIA.

Os níveis de potência obtidos com analisador de espectro, Figura 4 e A.1 até A.10, na região central, possuem níveis entre -40dB e -45dB. Os níveis de potência obtidos com a utilização do software NetStumbler e do cartão PCMCIA ficaram entre -38dB e -43dB. Devemos lembrar, também, que foi utilizados um cabo pequeno (RFS, 2005) de 0,36 metros com dois conectores, além do pigtail com seu comprimento de 0,20 m e dois conectores adicionais utilizados para permitir a conexão do cartão PCMCIA ao cabo conectado a antena utilizada nas medições no laboratório.

Sendo assim, se utilizarmos um valor médio de -40dB obtido pelo software NetStumbler. E adicionarmos:

- Ganho do cartão = 2,5 dB;
- Perdas no cabo (-0,09072dB) + Conectores (-1dB) = -1,09072 dB;
- Perdas no cabo (-0,232 dB) + Conectores (-1dB) = -1,232 dB.

Assim, teremos: $P = -40 + 2,5 - 1,09072 - 1,232 = -39,82272 \text{ dBm}$.

Esse valor está praticamente dentro da faixa de potência obtida utilizando o analisador de espectro. Esses resultados possibilitam a utilização do método de coleta de dados proposto tanto para análises qualitativas quanto para a análise quantitativas. Devemos lembrar que uma análise quantitativa mais precisa e confiável seria necessário à utilização do analisador de espectro em todas as medições realizadas. No entanto, para os objetivos propostos neste trabalho, dentro das limitações encontradas, os resultados são válidos e suficientes para serem considerados perfeitamente satisfatórios.

Capítulo 5

Medições Realizadas

As medições realizadas no laboratório, descritas no capítulo anterior, serviram para validar o método de medição utilizando o computador portátil com o software de aquisição. A partir desse ponto, foram realizadas as medições externas necessárias para se chegar aos objetivos desejados. A coleta de dados descrita abaixo se divide em: medidas externas em ambiente urbano e medidas dos enlaces de dados entre cidades.

As medidas externas em ambiente urbano são um conjunto de dados coletados em uma situação em que a antena da estação rádio base, de uma rede sem fio, transmite para diversas antenas clientes, aleatoriamente distribuídas, numa configuração conhecida como ponto-multiponto.

As medições dos enlaces de dados são um conjunto de dados obtidos em situações de comunicação ponto-a-ponto entre cidades.

5.1 Medidas externas em ambiente urbano

As medidas obtidas de medições externas em ambiente urbano foram realizadas na cidade de Esperança, interior do estado da Paraíba, Brasil, veja Tabela 5.1.

A cidade de Esperança foi escolhida por já possuir, desde junho de 2003, toda infra-estrutura instalada com a tecnologia *Wi-Fi* e pela facilidade em realizar as medidas necessárias.

A infra-estrutura, descrita na Figura 5.1, instalada para distribuição sem fio do acesso a Internet, no ambiente urbano, consiste em: roteador, servidor, e AP (ERB).

O roteador (CISCO, 2006) serve de interface entre o servidor principal e o modem de acesso a Internet fornecido pela companhia telefônica (GARMIN, 2006) (Serviço de acesso dedicado a Internet).

O servidor, conectado ao roteador, é responsável por todo o gerenciamento do fluxo de dados entre a rede sem fio e a Internet, utilizando o sistema operacional Linux (software livre)

Cidade:	Esperança	Areial	Areia	Lagoa Seca	Campina Grande
Fundação:	1925	1961	1815	1964	1788
Altitude (m) :	649	722	630	685	555
População (N habitantes):	28524	6016	24879	25717	376132
Área Total (km^2):	165,19	33,94	269,42	109,34	620,63
Dens. Demográfica (hab/ km^2):	172,67	177,25	92,34	235,20	606,05
Coordenadas Geográficas:	S 07°01.212' W 35°51.507'	S 07°03.111' W 35°55.475'	S 06°57.946' W 35°42.155'	S 07°09.721' W 35°51.166'	S 07°12.649' W 35°52.562'
Distância da Capital (km) :	≈ 145	≈ 152	≈ 135	≈ 127	≈ 120

Tabela 5.1: Dados gerais das cidades onde foram realizadas as medições. (IBGE, 2005)

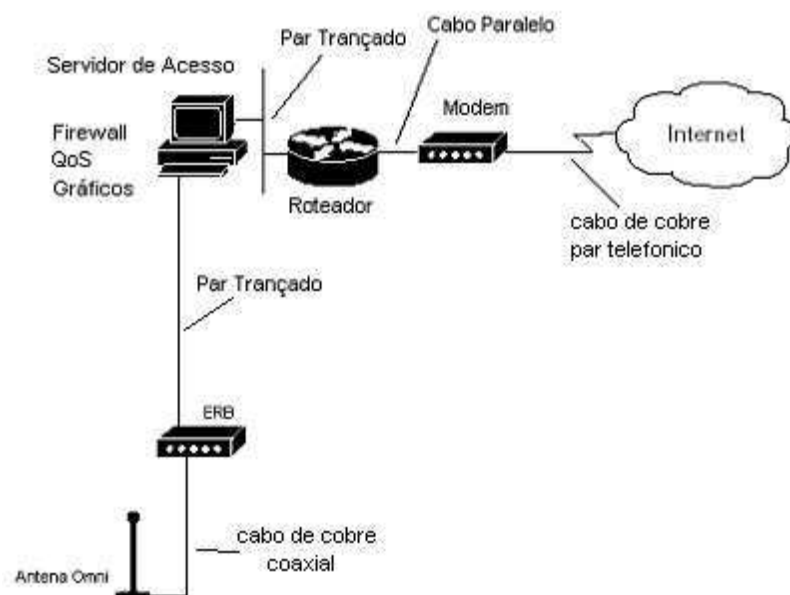


Figura 5.1: Infra-estrutura para distribuição em ambiente urbano

devidamente configurado para realizar tal tarefa. Nesse servidor também foi colocado um sistema de QoS (Qualidade do Serviço) (DAPENG; NEGI, 2003)- (KIM; JAMALIPOUR, 2001) para melhor aproveitamento dos recursos disponíveis.

A estação radio base, situada em cima de um edifício de três andares, consiste de:

- Antena Omni Direcional de 15 dBi (Figura 5.2 e Tabela 5.2);
- Tubo de aço galvanizado, com uma polegada de diâmetro e 5 metros de comprimento, para sustentação da antena omni;
- Cabo com 6 metros de comprimento (Figura 5.3);
- Conectores;
- Cartão PCMCIA Wireless (PROXIM, 2006);
- Ponto de acesso - (PROXIM, 2006) (Figura 5.4);
- Cabo par trançado com 20 metros (Figura 5.5);
- Conectores RJ 45 (Figura 5.5).

Lóbulo de Irradiação:	Vertical
Peso	0,820 kg
Comprimento	1,56 m
Material do Radome	Fiberglass
Resistência ao vento	100 km/h
Conectorização	"N" Fêmea
Frequência	2.400 - 2.500 MHz
Ganho	15 dBi
Impedância	50 Ohm
Máxima potência de entrada / Utilizada na ERB	100 W / 1 W
VSWR	1 : 1.5 max
Polarização	Vertical

Tabela 5.2: Características da antena omni direcional

A antena omni-direcional da ERB, no local onde foi colocada, possui visibilidade de aproximadamente 90% da área urbana da cidade de Esperança; veja fotos tiradas no local nas Figuras 5.6

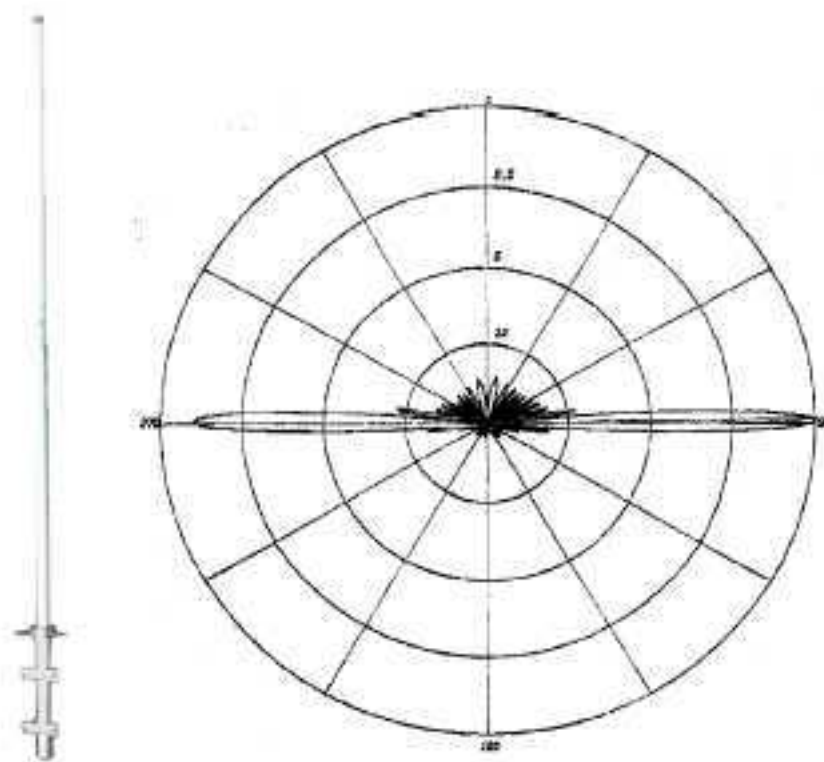


Figura 5.2: Antena Omni Direcional utilizada na ERB e seu diagrama de irradiação



Figura 5.3: Cabo RGC 213 utilizado na ERB e nas conexões das antenas clientes. Possui perda de 25,2dB/100m na faixa de frequência de 2400 - 2500 MHz



Figura 5.4: Ponto de acesso AP-2000 (PROXIM, 2006)



Figura 5.5: Conectores RJ 45 e cabo do tipo par trançado utilizados para conectar a ERB ao servidor principal

a 5.9. A área urbana restante, 10%, está em área de sombra devido a edifícios de mesma altura, grandes árvores, igrejas e depressão acentuada do relevo. Para o funcionamento adequado em ambiente urbano, fato verificado na prática, é necessário que a linha de visada direta entre as antenas esteja totalmente desobstruída.



Figura 5.6: Vista aérea nas direções a partir da ERB em Esperança (Leste)

Os dados de posição (coordenadas geográficas, altura e precisão das medidas) foram obtidos com um GPS (Global Position System) (GARMIN, 2006), Figura 5.10. Esse modelo de GPS já vem com o cabo de interface serial para conexão com o *Notebook* e aquisição dos dados de posição pelo software *NetStumbler*. Durante o período de aquisição de dados de posição, observou-se que a precisão do GPS ficava entre 6,4 m e 13,5 m dependendo do nível de sinal e do número de satélites captados pelo equipamento.

Na Tabela 5.3, estão os dados referentes à posição da ERB e que consideramos, aqui, como ponto de referência, pois todas as antenas estão apontadas para esta ERB.



Figura 5.7: Vista aérea nas direções a partir da ERB em Esperança (Oeste)



Figura 5.8: Vista aérea nas direções a partir da ERB em Esperança (Sul)



Figura 5.9: Vista aérea nas direções a partir da ERB em Esperança (Norte)



Figura 5.10: GPS Garmin utilizado nas medidas

Coordenadas Geográficas:	S 07° 01.212' W 35° 51.507'
Altura registrada pelo GPS	650,7 m
Precisão do GPS no instante da medição	6,6 m
Altura da antena acima do GPS	4 m
Comprimento aproximado do cabo - Antena / AP	6 m
Conectores N - Macho	1
Conectores N - Fêmea	1
Pigtail	1

Tabela 5.3: Dados obtidos no local da ERB (Esperança)

A partir daí foram escolhidos vinte pontos (20 usuários) aleatórios pertencentes à base de clientes do provedor de acesso a Internet, LSNET (LSNET, 2006), e que possuíam as seguintes características:

- Antenas em grade instalada e com visada direta com a ERB;
- Fácil acesso e permissão do usuário para realização dos testes;
- Equipamentos de aquisição dos dados funcionando corretamente.

A antena instalada nas edificações, clientes, e utilizadas nesses testes, possuem características mostradas na Tabela 5.4 e itens ilustrados na Figura 5.11. Os equipamentos da Figura 5.11 são os mesmos utilizados no laboratório, com exceção da antena em grade.

Nos usuários escolhidos para a realização das medições, o cabo conectado à antena cliente e que estava conectado à placa PCI de rede sem fio do PC por meio do *pigtail*, foi desconectado e ligado ao equipamento para aquisição dos dados. Esse é mostrado na Figura 5.11.

O acesso fácil e a permissão do usuário para realização dos testes se fizeram necessários porque durante a realização dos testes a utilização da Internet precisava ser interrompida. Um item bastante relevante durante o processo de aquisição dos dados, foi a possibilidade ou não do funcionamento correto dos equipamentos utilizados. Isso porque, encontraram-se alguns obstáculos de ordem prática durante a coleta dos dados. O GPS precisava ficar em ambientes abertos e externos para permitir que o equipamento obtivesse níveis de sinais dos satélites, suficientes para o correto funcionamento do mesmo. Porém, as extremidades dos cabos que ligam as antenas, localizadas na parte superior das edificações, aos computadores dos usuários,

Faixa de freqüência de operação (GHz)	2,4 - 2,4835
Polarização	linear
Ganho na freqüência central (dBi)	24,0
Largura de feixe de 3 dB (graus)	9,8
Impedância de entrada (Ohms)	50
Relação de onda estacionária máxima	1,3 : 1
Relação frente costas mínima (dB)	28
Isolação de polarização mínima (dB)	20
Sobrevivência a ventos (km/h)	100
Conector	N-Macho
Peso embalagem (kgf)	2,5
Tamanho da embalagem L (cm) x P (cm) x A (cm)	83 x 69 x 15

Tabela 5.4: Características da antena com refletor tipo grade utilizado nas medições nos clientes

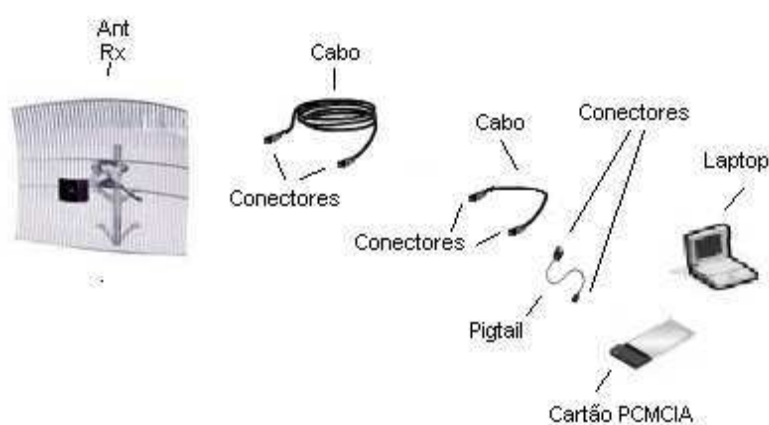


Figura 5.11: Equipamentos utilizados nas medições em cada cliente

ficam em ambientes internos (quartos, salas, etc). Dessa forma, acrescentou-se um cabo de 5,05 metros com dois conectores, mostrado na Figura 5.11, para permitir que o GPS, conectado ao Notebook utilizando a porta serial, ficassem em condições normais de funcionamento. A partir daí o equipamento foi ligado e realizou-se a coleta dos dados, durante aproximadamente 5 minutos. Esse tempo foi suficiente para coletarmos entre 120 e 350 medidas de posição (coordenadas, altura e precisão), nível de sinal, nível de ruído e SNR. Dependendo do período de tempo utilizado obteve-se uma menor ou uma maior quantidade de posições melhorando a exatidão dos dados coletados.

O procedimento descrito acima foi repetido em cada um dos vinte usuários escolhidos. O software de aquisição de dados permitiu gravar e exportar, os dados coletados para uma planilha do Excel. Com isso foi possível usar as próprias ferramentas da planilha para obtermos os valores médios e desvio padrão das medidas desejadas. A Tabela 5.5 ilustra os resultados médios obtidos.

Usuário	1	2	3	4
S (sul)	S 7,0283666°	S 7,015832424°	S 7,0227600276°	S 7,021785421°
W (oeste)	W 35,856800°	W 35,85588683°	W 35,86280968°	W 35,85948034°
Altura (m)	638,5	642,2	650,7	638,1
Precisão do GPS (3D)	9,2 m	7,8 m	9,2 m	10,2 m
SNR (dB)	9,723776	22,94194	6,408163	19,49032
Nível de Sinal (dBm)	-71,74126	-75,54194	-81,42857	-76,56774
Nível de Ruído (dBm)	-81,465036	-98,48388	-87,836733	-96,05806
N de Medidas	285	160	146	154
Tamanho do Cabo	5	5	8	6
Delta H (m)	3	4	5	3

Tabela 5.5: Dados coletados nos usuários de 1 a 4. Demais Tabelas no anexo C.

5.2 Medidas dos enlaces de dados entre cidades

Os procedimentos seguintes, como previstos no início deste trabalho, foram a realização das medidas dos enlaces de dados entre cidades. Os enlaces de dados escolhidos fazem parte do sistema de integração da rede de dados do provedor de acesso a Internet, LSNET, e foram os seguintes:

- Enlaces de dados 1 - Esperança - Areial;
- Enlaces de dados 2 - repetidora Esperança - repetidora Areia;
- Enlaces de dados 3 - Campina Grande - Lagoa Seca.

Para realização da análise teórica dos enlaces, já implementados, inicialmente foi necessária a obtenção da topografia do terreno entre cada um deles. Essa topografia foi obtida com as cartas topográficas da região, prontamente fornecidas pela ADENE (ADENE, 2006) (Agência de Desenvolvimento do Nordeste - antiga SUDENE). A carta folha SB.25-Y-C-I MI-1212 na escala 1:100.000, permitiu o levantamento topográfico da região e um posterior cálculo dos parâmetros necessários para análise do enlace. Nas Figuras em anexo D.1, D.2 e D.3 são ilustradas as topografias das regiões envolvidas em cada um dos enlaces. Devemos salientar que no enlace repetidora Esperança - repetidora Areia, apenas parte da região envolvida está disponível na carta topográfica obtida como se pode notar na Figura D.2. Os dados restantes necessários para os cálculos do enlace citado foram obtidos a partir de medições feitas com o GPS em alguns pontos do mesmo. Esse procedimento serve apenas como aproximação da análise do enlace envolvido. Nos outros, a carta topográfica obtida forneceu todos dados necessários desejado.

5.2.1 Enlace Esperança - Areial

O enlace entre a cidade de Esperança e a cidade de Areial, Figura 5.12, região mostrada na Figura D.1, é do tipo ponto-a-ponto e é utilizado para interligar duas ERB's. No trecho, a comunicação consiste do envio do sinal de uma ERB para outra correspondendo evidentemente às cidades de Esperança e Areial. Evidencia-se que elas são semelhantes e utilizáveis para uma distribuição local. A comunicação (sem fio) se faz com antenas (Figura 5.11 e Tabela 5.4) idênticas (transmissão e recepção).

Na ERB de Esperança, como já descrito na Tabela 5.3, existe um ponto de acesso, Figura 5.4. Esse possui dois *slots* para cartão do tipo PCMCIA, também descrito no capítulo anterior. Um dos cartões é utilizado na ERB local e o outro é utilizado no enlace de dados entre Esperança e Areial. Maiores detalhes do esquema podem ser vistos na Figura 5.12.

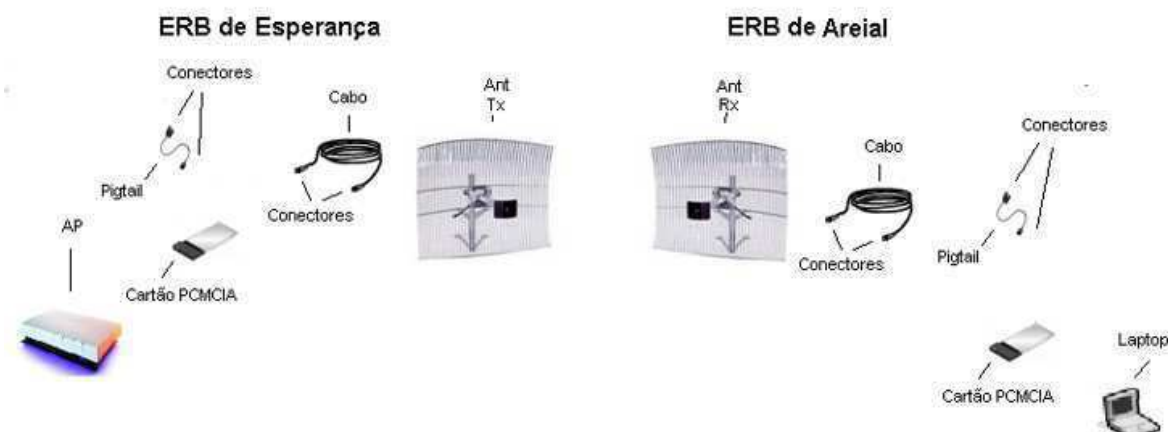


Figura 5.12: Enlace Esperança - Areial - Equipamentos utilizados nas medições

Na recepção, em Areial, utilizamos: uma antena com refletor tipo grade de 24 dB e um cabo (RGC213) de doze metros. Nesse, ligamos os equipamentos de medição (*pigtail*, cartão PCMCIA, Notebook e GPS). Como antes, na recepção o software *NetStumbler* é utilizado para coletar os dados necessários na análise do enlace. Os resultados estão na Tabela 5.6.

Coordenadas Geográficas:	S 07,051776432° W 35,9246727°
Altura registrada pelo GPS no local	717,8 m
Precisão do GPS no instante da medição	7,8 m
Altura da antena acima do GPS	6 m
Comprimento aproximado do cabo - Antena / AP	12 m
Conectores N - Fêmea	2
SNR	14,10959 dB
Nível de Sinal	- 81,58904 dBm
Nível de Ruído	- 95,69863 dBm

Tabela 5.6: Dados obtidos na ERB (Areial)

5.2.2 Enlace repetidora Esperança - repetidora Areia

O segundo enlace em que os dados foram coletados foi estabelecido entre a repetidora de Esperança e a repetidora de Areia, região mostrada, em parte, na Figura D.2 em anexo. É

necessário observar que apenas parte da região envolvida no enlace está disponível na Figura D.2. Os dados restantes necessários para os cálculos do enlace citado foram medidos com o GPS nos pontos do enlace e que não estavam incluídos na carta da ADENE. Na Figura 5.13 podem ser visualizados todo o material e equipamento empregado.

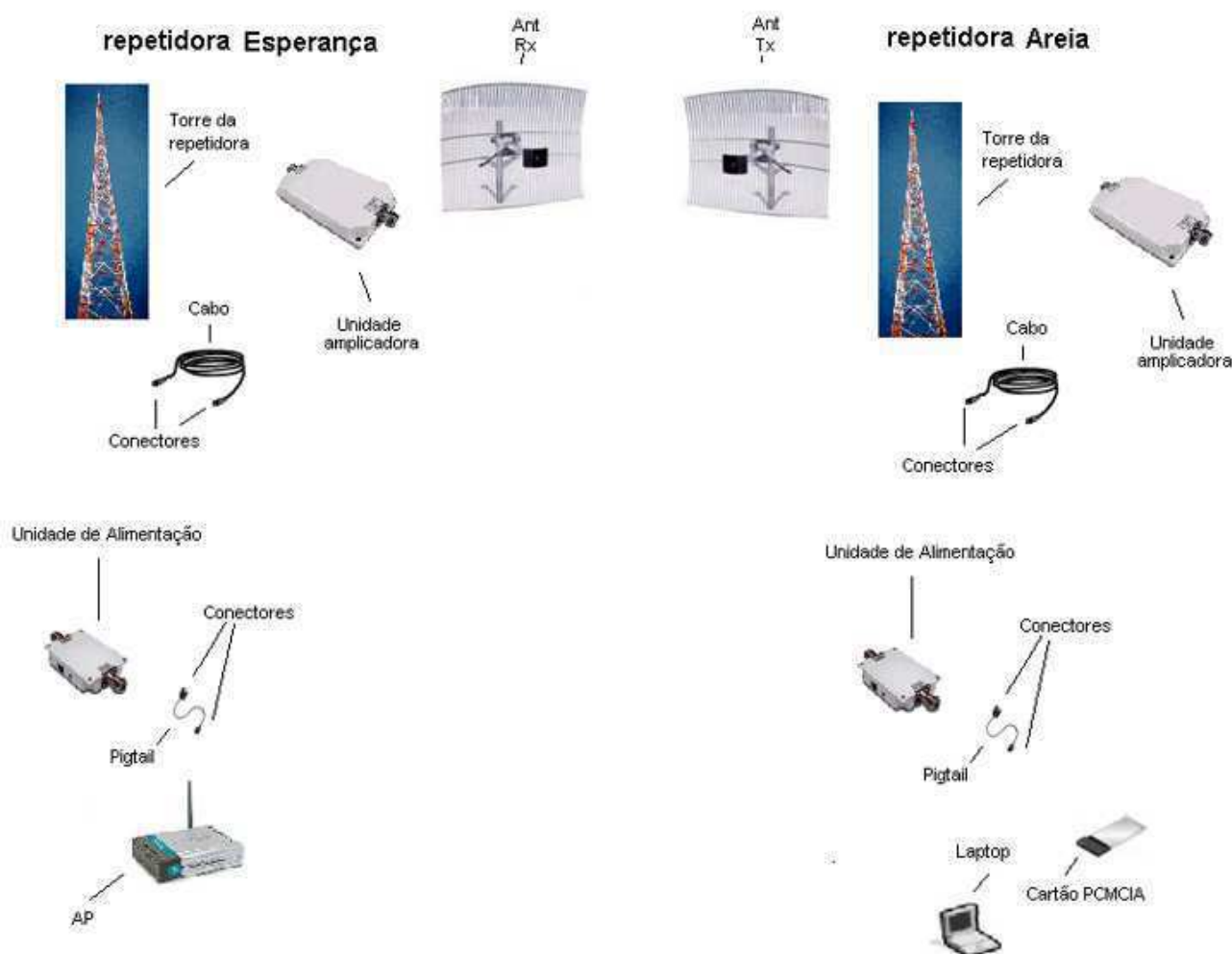


Figura 5.13: Enlace Esperança - Areia - Equipamentos utilizados nas medições

A principal diferença desse caso em relação ao enlace anteriormente descrito é a presença de dois amplificadores de 1 Watt (DME, 2006), Figura 5.14, um em cada ponto. Suas características são apresentadas na Tabela 5.7. Os dois amplificadores foram colocados para otimizar o nível da transmissão afetado pelo desvanecimento presente no trecho (17,55 km).

Na repetidora de Esperança colocou-se um AP como transmissor e mediu-se o sinal na repetidora de Areia com os mesmos equipamentos utilizados nas medições anteriores. Os valores obtidos são apresentados nas Tabela 5.8 e 5.9.



Figura 5.14: Amplificador de 1 Watt utilizado no enlace. À esquerda vê-se o dispositivo alimentador. À direita encontra-se a unidade amplificadora

Característica	Valor
Banda de frequência de funcionamento (MHz)	2400 - 2500
Dimensões (mm)	120 x 72 x 17,5
Peso (kg)	0,380
Tempo para recuperação de falhas (segundos)	> 20
Taxa de erro	$< 10^{-8}$
Potência de entrada	AGC
Ganho de recepção	17 dB
Ganho de transmissão	30 dB
Alimentação (VAC)	100 a 230
Consumo (mA)	900

Tabela 5.7: Características da antena omnidirecional

Coordenadas Geográficas:	S 06,96576667° W 35,70258333°
Altura registrada pelo GPS no local	630,5 m
Precisão do GPS no instante da medição	12,5 m
Altura da antena acima do GPS	7 m
Comprimento aproximado do cabo - Antena / AP	10 m
Conectores N - Macho	1
Conectores N - Fêmea	1
SNR	47,62000 dB
Nível de Sinal	- 49,5000 dBm
Nível de Ruído	- 97,1200 dBm

Tabela 5.8: Dados obtidos na Repetidora Areia

Coordenadas Geográficas:	S 07,018510416° W 35,84716834°
Altura registrada pelo GPS no local	642 m
Precisão do GPS no instante da medição	7,6 m
Altura da antena acima do GPS	25 m
Comprimento aproximado do cabo - Antena / AP	35 m
Conectores N - Macho	1
Conectores N - Fêmea	1

Tabela 5.9: Dados obtidos na Repetidora Esperança

5.2.3 Enlace ERB Campina Grande - Repetidora Lagoa Seca

O terceiro e último enlace, Figura D.3, foi o enlace de dados entre as cidades de Campina Grande e a cidade de Lagoa Seca, mostrado na Figura 5.15.

A diferença entre esse caso e os dois anteriores refere-se aos modelos de antenas utilizados. A antena transmissora utilizada foi do tipo omnidirecional de 15 dBi, igual à da Figura 5.2. Na recepção foi utilizada uma antena tipo painel de 12 dBi, Figura 5.16 e característica na Tabela 5.10.

Os demais componentes presentes na Figura 5.15 são os mesmos utilizados no enlace entre as repetidoras de Esperança e Areia.

Característica	Valor
Banda de frequência de funcionamento (MHz)	2100 - 2850
Dimensões (mm)	178 x 178 x 3,17
Peso (kg)	0,35
Tipo do conector	N - Fêmea
Polarização	dupla
Potencia máxima (W)	100
Ganho (dBi)	12
Impedância (Ohm)	50
Alimentação (VAC)	100 a 230
ROE	1,5 : 1
Resistência ao vento (km/h)	100

Tabela 5.10: Características da antena painel

O procedimento para coleta dos dados foi equivalente ao realizado nos dois casos anteriores. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 5.11 e 5.12.

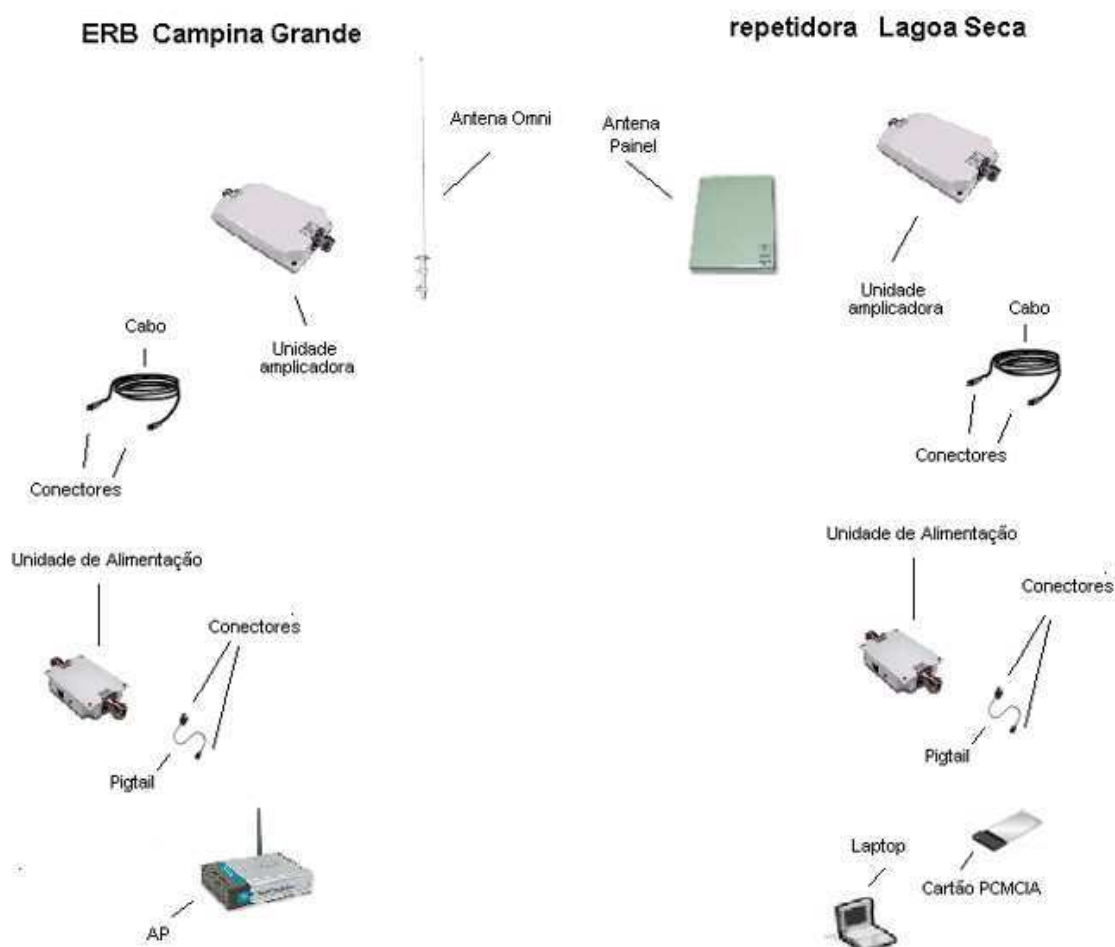


Figura 5.15: Enlace ERB Campina Grande - Repetidora Lagoa Seca - Equipamentos utilizados nas medições



Figura 5.16: Antena tipo painel

Coordenadas Geográficas:	S 07,162059138° W 35,85285799°
Altura registrada pelo GPS no local	687,5 m
Precisão do GPS no instante da medição	11,3 m
Altura da antena acima do GPS	0,15 m
Comprimento aproximado do cabo - Antena / AP	3 m
Conectores N - Macho	1
Conectores N - Fêmea	1
SNR	16,44922 dB
Nível de Sinal	- 66,60938 dBm
Nível de Ruído	- 83,05859 dBm

Tabela 5.11: Dados obtidos em repetidora Lagoa Seca

Coordenadas Geográficas:	S 07,210816667° W 35,87603333°
Altura registrada pelo GPS no local	555,2 m
Precisão do GPS no instante da medição	6,9 m
Altura da antena acima do GPS	5 m
Comprimento aproximado do cabo - Antena / AP	7 m
Conectores N - Macho	1
Conectores N - Fêmea	1

Tabela 5.12: Dados obtidos na ERB em Campina Grande

Capítulo 6

Analizando os Resultados

Neste capítulo são descritos e analisados os resultados obtidos. Também é feita a comparação entre os resultados previstos pelos modelos de predição de propagação e os resultados coletados. Os resultados são divididos em: Resultados Ponto-Multiponto (Distribuição em uma área urbana) e Ponto-a-Ponto (Enlace entre as cidades).

6.1 Analizando os Resultados - Ponto-Multiponto

Antes de analisar os resultados coletados e apresentados no capítulo anterior, precisamos primeiro converter os valores obtidos pelo GPS, coordenadas geográficas, S(sul) e W(oeste) para um sistema de coordenadas esféricas.

A Figura 6.1, ilustra os dois sistemas, coordenadas geográficas e coordenadas esféricas a serem utilizados.

No cálculo da distância entre dois pontos, por exemplo, entre a ERB e uma antena cliente, precisa-se da conversão adequada dos dados. Para isso, a leitura do ângulo S(sul) do GPS corresponde ao ângulo formado entre a linha do equador e o ponto medido. Assim, para convertermos o ângulo θ em coordenadas GPS para coordenadas esféricas, precisamos somar o valor medido com um ângulo de 90 graus. Já para obtermos o ângulo ϕ , precisamos apenas usar o valor negativo do ângulo medido W(oeste) pelo GPS. Isso é feito porque em coordenadas geográficas o ângulo da longitude medido está no sentido oposto ao ângulo ϕ utilizado em coordenadas esféricas.

O valor de "r", em coordenadas esféricas, é obtido somando-se o valor da altura coletado pelo GPS, o valor médio do raio da terra e altura da antena acima do GPS. Devemos lembrar que isso é feito, pois o GPS considera o nível do mar como nível zero. E o local de leitura, na maioria das vezes está um pouco abaixo do local onde a antena está instalada.

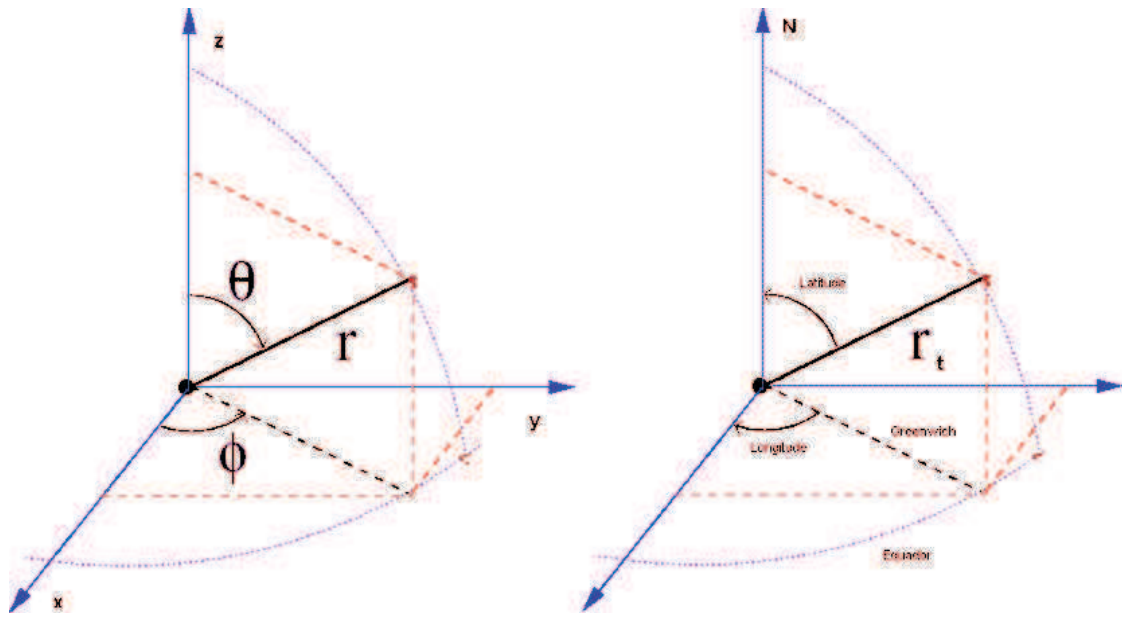


Figura 6.1: Coordenadas Esféricas e Coordenadas Geográficas

Abaixo estão as equações utilizadas nas conversões das medidas:

$$\theta = 90^\circ + ANG_s \quad (6.1)$$

Onde:

ANG_s = Ângulo S(sul) marcado pelo GPS

$$\phi = (-1).ANG_w \quad (6.2)$$

ANG_w = Ângulo W(oeste) marcado pelo GPS

$$r = R_e + h_{GPS} + h_{ant} \quad (6.3)$$

Onde:

R_e = O raio médio da terra é dado por 6378 km.

h_{GPS} = Altura marcada pelo GPS.

h_{ant} = Altura da antena.

A partir daí, para calcularmos a distância entre dois pontos usamos a equação mostrada abaixo (HAYT, 1994):

$$d = \sqrt{(X_{ERB} - X_c)^2 + (Y_{ERB} - Y_c)^2 + (Z_{ERB} - Z_c)^2} \quad (6.4)$$

Onde, para a ERB temos:

$$\begin{aligned} X_{ERB} &= r_{ERB} \cdot \text{Sen}\theta_{ERB} \cdot \text{Cos}\phi_{ERB} \\ Y_{ERB} &= r_{ERB} \cdot \text{Sen}\theta_{ERB} \cdot \text{Sen}\phi_{ERB} \\ Z_{ERB} &= r_{ERB} \cdot \text{Cos}\theta_{ERB} \end{aligned} \quad (6.5)$$

E para os dados dos clientes:

$$\begin{aligned} X_c &= r_c \cdot \text{Sen}\theta_c \cdot \text{Cos}\phi_c \\ Y_c &= r_c \cdot \text{Sen}\theta_c \cdot \text{Sen}\phi_c \\ Z_c &= r_c \cdot \text{Cos}\theta_c \end{aligned} \quad (6.6)$$

Utilizando a Tabela 5.3, capítulo anterior, que mostra os dados para a ERB e as equações 6.1, 6.2, 6.3 e 6.5, chegamos a Tabela 6.1, dados coletados, convertidos, da ERB da cidade de Esperança:

Ângulos	S 07° 01.212' W 35° 51.507'
Altura registrada pelo GPS	650,7 m
Precisão do GPS no instante da medição	6,6 m
Altura da antena acima do GPS	4 m
Comprimento aproximado do cabo - Antena / AP	6 m
Raio total	6.378.654,7 m
X_{ERB}	5.130.930,43962 m
Y_{ERB}	- 3.708.506,57864 m
Z_{ERB}	- 779.594,485487 m

Tabela 6.1: Dados obtidos para a ERB (Esperança)

Realizando um procedimento semelhante ao realizado acima, aplicado agora aos dados dos usuários, chegaremos aos valores apresentados na Tabela 6.2 e no Anexo E. Este anexo refere-se a dados correspondentes a outros usuários e que estão disponíveis para prováveis interessados.

Na tabela 6.2, e nas tabelas apresentadas no Anexo E, apareceu uma nova linha, última, que se refere a distância entre a ERB e o cliente. Essa distância foi obtida utilizando os valores de X,Y e Z da ERB e dos clientes na equação 6.4.

Na Figura 6.2 são ilustrados os valores de potência do sinal recebido pelo cliente versus distância entre o cliente e a ERB. Esses dados foram obtidos das Tabela 6.2 e das Tabelas do Anexo E. O gráfico, por sua vez, foi obtido com o auxílio do software MATLAB 7.0 e usando a função plot, Figura 6.2.

Usuário	1	2	3
Altura registrada pelo GPS (m)	638,5	642,2	650,7
Delta H (m) (Altura da antena acima do GPS)	3,00	4,00	5,00
Nível de Sinal (dBm)	-71,74126	-75,54194	-81,42857
Ângulo θ (rad)	1,6934645	1,6932457	1,6933666
Ângulo ϕ (rad)	5,6573661	5,6573820	5,6572612
Raio total (m)	6.378.641,50	6.378.646,20	6.378.655,70
X_C (m)	5.130.936,5047270	5.131.137,6502384	5.130.620,8113930
Y_C (m)	-3.708.286,0162754	-3.708.306,8960911	-3.708.877,1553878
Z_C (m)	-780.495,2219445	-779.110,8544254	-779.877,4744062
Distância ERB Cliente (m)	927,3676229	562,7684821	559,7137601

Tabela 6.2: Dados convertidos dos usuários - Dados complementares no Anexo E.

Em seguida, é feita uma comparação dos resultados da Figura 6.2 com os resultados previstos em alguns modelos de perdas de propagação em ambiente urbano. As equações apresentadas nos modelos a seguir têm seus parâmetros, quando possível, ajustados de acordo com os dados obtidos e que melhor se adaptem as condições encontradas. Foram acrescentados em todos os modelos de perdas de propagação um valor G_t (Ganho total) referente aos ganhos das antenas e dos dois cartões PCMCIA somado algebricamente com as perdas dos cabos, conectores e pigtail presentes na ERB e nos pontos de medição. A composição do valor de G_t foi obtida pela soma dos valores apresentados na Tabela Figura 6.3.

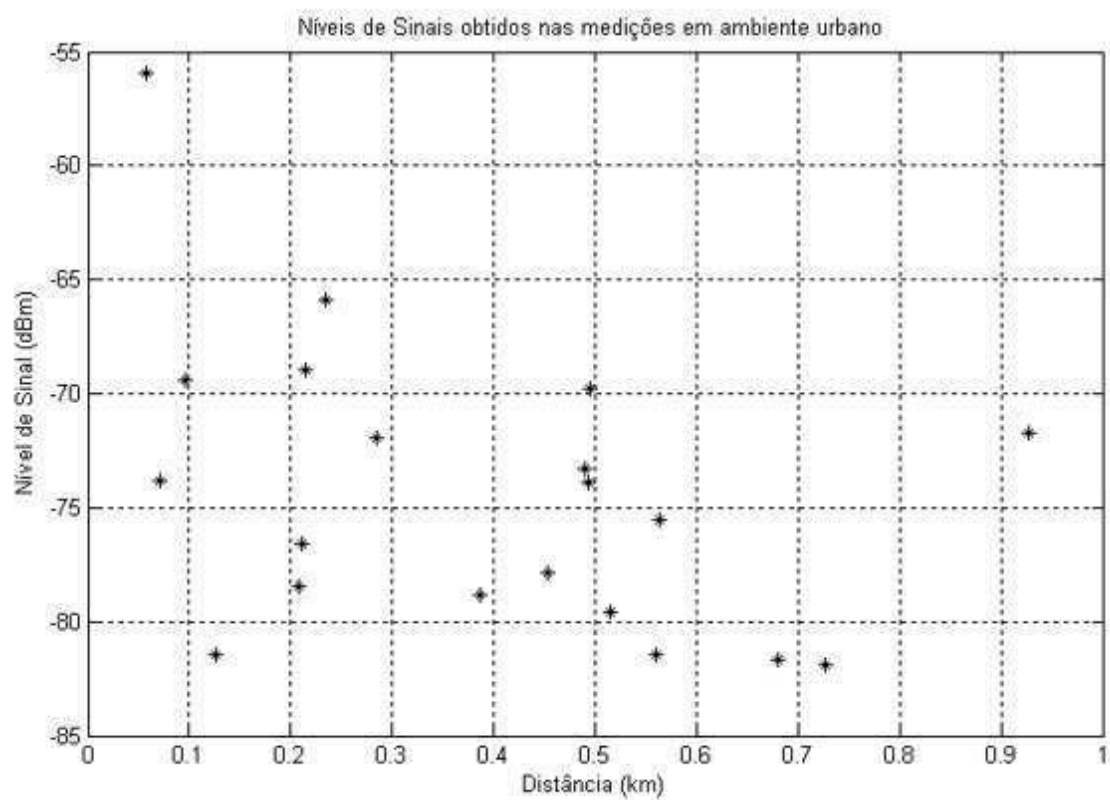


Figura 6.2: Nível de Sinal x Distância - Obtidos nas medições dos vinte usuários na cidade de Esperança

Transmissor	Ganho / Perda
Ganho da Antena Omnidirecional (ERB)	15 dB
Perdas nos conectores da ERB (2 unid.)	- 1 dB
Perda no pigtail da ERB (1 unid.)	- 0,5 dB
Perdas no cabo da ERB (6m x -0,252dB)	- 1,512 dB
Ganho do Cartão PCMICIA usado no AP (ERB)	2,5 dB
Potência Transmitida	15 dBm (+/- 2 dB)
Receptor	Ganho / Perda
Ganho da Antena com refletor tipo grade (cliente)	24 dB
Perdas nos conectores do equipamento de medição (4 unid.)	- 2 dB
Perda no pigtail (1 unid.)	- 0,5 dB
Perdas no cabo (aprox. 10m x -0,252dB)	- 2,52 dB
Ganho do Cartão PCMICIA usado na medição	2,5 dB
Total (G_t)	50,968 dB

Tabela 6.3: Composição do valor de G_t

6.1.1 Comparação com o Modelo de Okumura-Hata

Nesse modelo foram utilizadas as equações 3.1, 3.2 e 3.5, apresentadas no capítulo sobre modelos e repetidas aqui por conveniência.

$$L_p = 69,55 + 26,16 \log f_c - 13,82 \log h_b - a^* + (44,9 - 6,55 \log h_b) \log R \quad (6.7)$$

onde

$$a = (1,1 \log f_c - 0,7)h_m - (1,56 \log f_c - 0,8) \quad (6.8)$$

Logo

$$L_{ps} = L_p\{AreaUrbana\} - 2\{\log(\frac{f_c}{28})\}^2 - 5,4 \quad (6.9)$$

Nas medições realizadas foi utilizado o canal um, na estação rádio base, ou seja, a frequência central de trabalho foi de 2412 MHz. A altura da ERB analisada foi de 18 metros, situada no topo de um prédio de três andares. À distância "R" (km), ERB $\longleftrightarrow$ Cliente, foi introduzida considerando uma variação entre 100 metros (0.1 km) e 1000 metros (1 km) com incrementos de 10 em 10 metros (0.01 km).

Na Figura 6.3 são ilustrados os resultados obtidos quando inserimos no mesmo gráficos as medidas realizadas e as curvas geradas no MATLAB para o modelo de Okumura. Os valores 3m, 4m, 5m e 6m representam a altura média da antenna cliente (h_m) utilizada nas equações.

As curvas obtidas pelo modelo de Okumura apresentam valores de perdas de propagação menores que os valores encontrados nas medições realizadas. Essa diferença ficou bem evidente em toda faixa de distância avaliada. Medidas de distância utilizadas nesse caso são consideradas pequenas se comparadas a faixa de validade do modelo, 1 a 20 km.

Outros fatores relevantes são:

- A frequência utilizada, 2412 MHz, está bem acima da faixa de frequência de validade do modelo que vai até 1500 MHz.
- A altura da ERB está abaixo das medidas válidas para o modelo. A altura é outro fator importante nas equações e novamente o sistema avaliado não se enquadra na faixa de validade do modelo de Okumura.

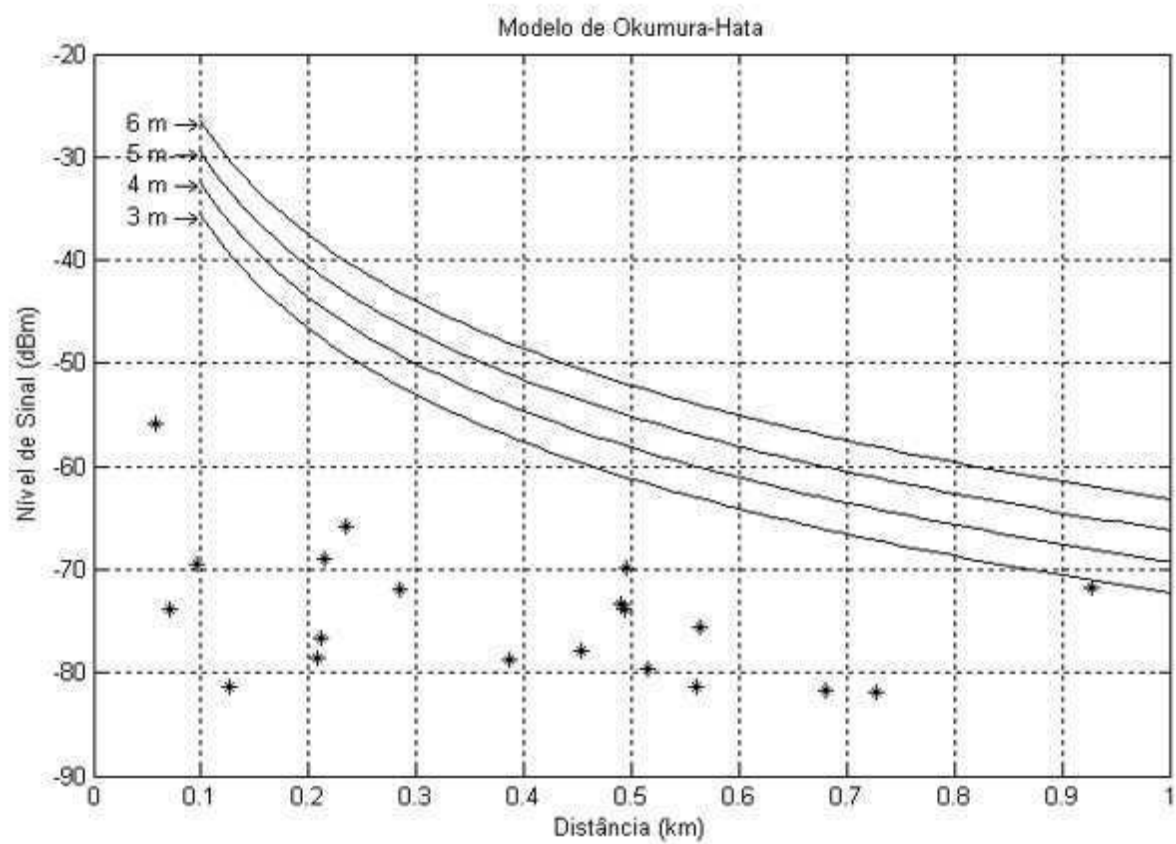


Figura 6.3: Curvas obtidas no Modelo de Okumura-Hata

O modelo e o trabalho em questão (Okumura-Hata) é utilizado como referência em muitos outros modelos de perdas de propagação em ambiente urbano, justificando assim a importância da comparação aqui realizada.

Apesar dos fatores desfavoráveis citados acima, se consideramos a margem de precisão do GPS, com média de 9,12 metros e variação entre 6,90 e 14,2 metros, o modelo apresentou resultados coerentes, apresentando o mesmo comportamento de decaimento do nível de sinal com a distância.

6.1.2 Comparação com o Modelo do CCIR

O modelo do CCIR baseia-se no de Okumura-Hata. Suas equações são quase idênticas, exceto pelo acréscimo do fator de correção B , para o cálculo das perdas e que se refere à porcentagem de prédios sobre o terreno, B_1 e que é obtido através da equação 3.8, capítulo 3.

$$L = 69,55 + 26,16 \log f_c - 13,82 \log h_b - a + (44,9 - 6,55 \log h_b) \log R - B \quad (6.10)$$

Onde:

O termo " a " é o mesmo da equação 6.8

$$E B = 30 - 25 \log B_1$$

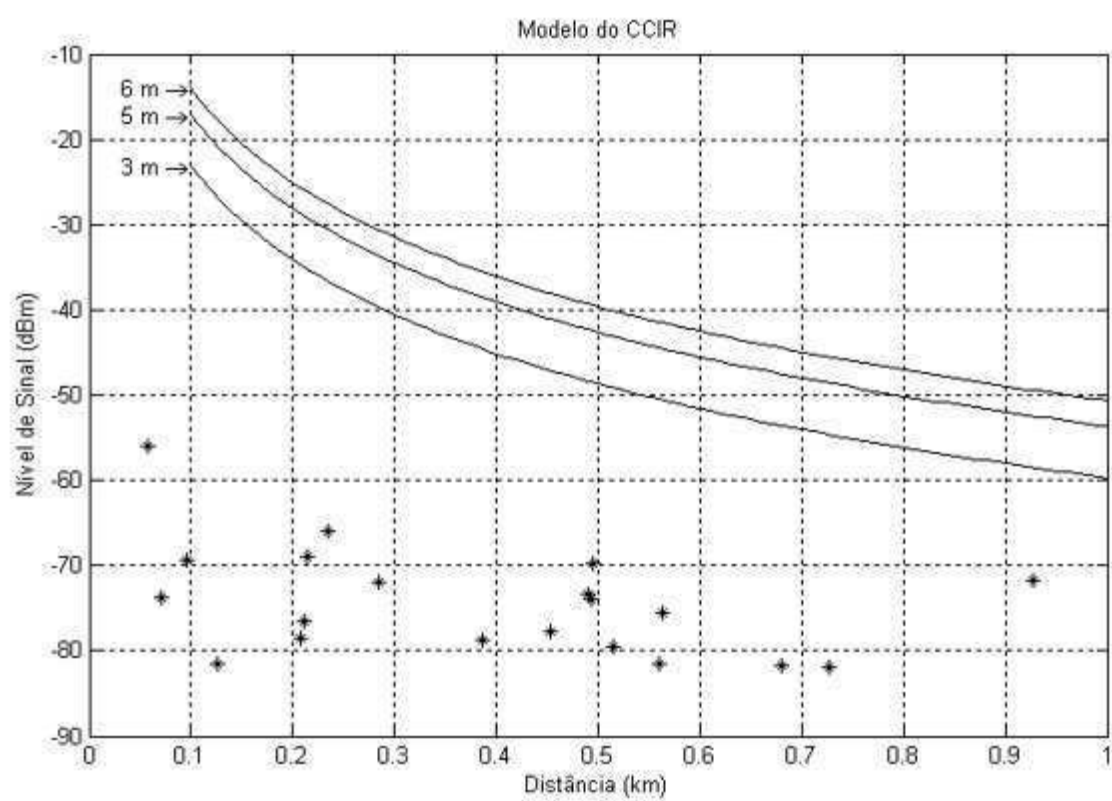
Com B_1 significando a porcentagem de prédios sobre o terreno que varia de 3 a 50%.

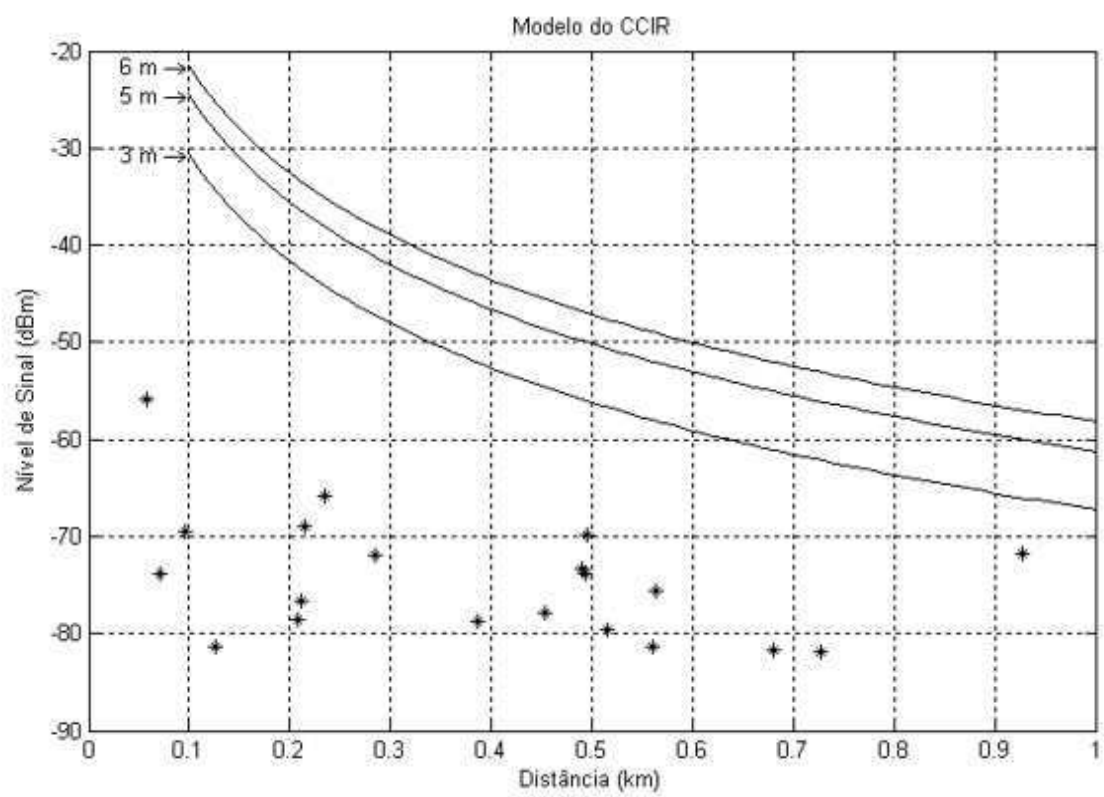
Nos resultados apresentados nas figuras Figura 6.4 a Figura 6.7, foram considerados valores para o termo B_1 como sendo 5%, 10%, 15% e 20%. Aqui foi suposto que o termo B_1 , porcentagem de "prédios sobre o terreno" também serviria para a porcentagem de "edificações sobre o terreno" (casas e pequenos edifícios). Essa situação está mais próxima da realidade das medições realizadas.

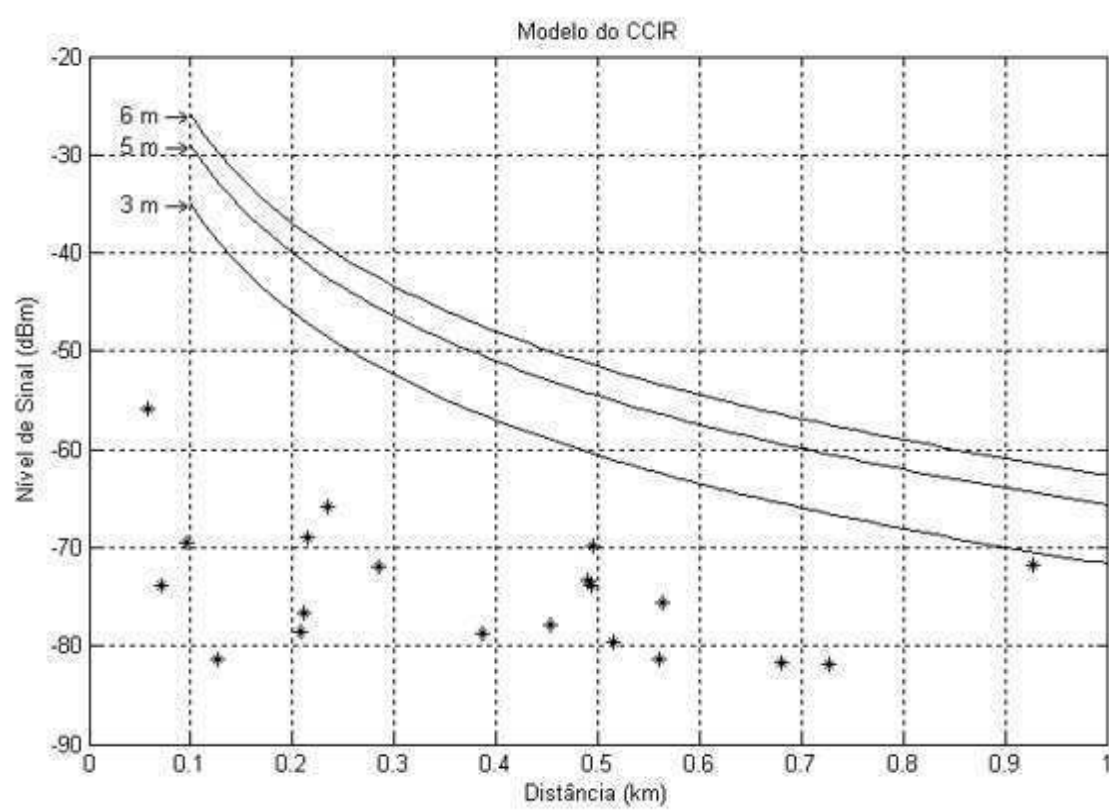
A exemplo das comparações anteriores também são apresentadas curvas para três valores de h_m (3, 5 e 6 metros). Essa variação na altura da antena cliente tenta mostrar a influência daquele parâmetro no modelo de propagação, além de tentar aproximar mais o modelo dos valores coletados.

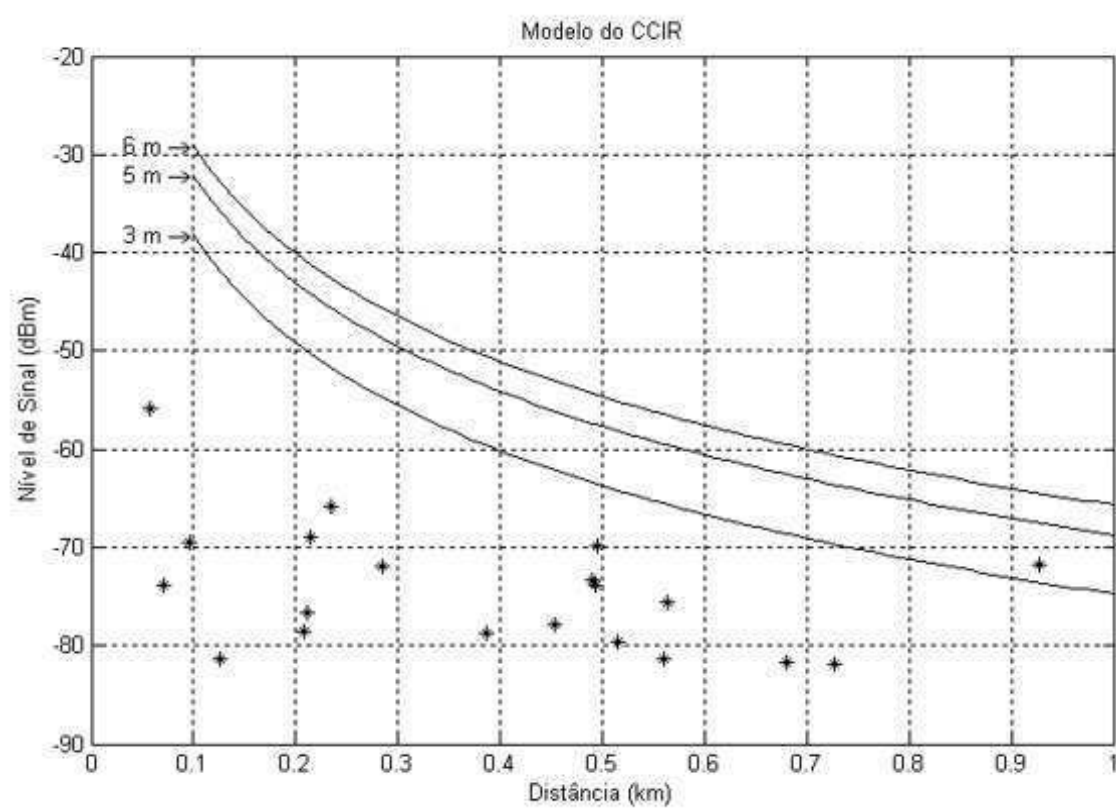
Observa-se que o aumento no número de edificações no terreno, de 5% para 20%, faz com que o modelo se aproxime mais das medidas realizadas, principalmente para os pontos distantes da estação rádio base. Nos pontos próximos a ERB, a grande discrepância se repetiu. Os motivos das diferenças citados no modelo anterior, também são válidos aqui, pelo fato das equações serem basicamente as mesmas de Okumura com exceção do termo B .

As curvas obtidas sugerem que se considerarmos o fator B_1 como porcentagem de edificações sobre o terreno, incluindo casas e não somente de edifícios com mais de um pavimento como

Figura 6.4: Curvas obtidas no Modelo do CCIR para $B_1 = 5\%$

Figura 6.5: Curvas obtidas no Modelo do CCIR para $B_1 = 10\%$

Figura 6.6: Curvas obtidas no Modelo do CCIR para $B_1 = 15\%$

Figura 6.7: Curvas obtidas no Modelo do CCIR para $B_1 = 20\%$

originalmente proposto, é possível chegar a bons resultados. No entanto, se dispuséssemos de dados mais concretos sobre a densidade de edificações na cidade, em vez de apenas supor os valores para a situação avaliada, os valores das simulações seriam mais exatos.

6.1.3 Comparação com o Modelo de Hata-Estendido

O modelo de Hata-Estendido é baseado no de Hata alterado para abranger uma faixa de frequência maior. A equação utilizada e o resultados obtidos são ilustrados seguir. Aqui a frequência utilizada nas medidas se aproxima da frequência proposta no modelo.

$$L_{xhata} = 46,33 + (44,9 - 6,55 \log h_b) \log R + 33,9 \log f_c - a - 13,82 \log h_b + C \quad (6.11)$$

Onde, C é um parâmetro de ajuste compreendendo se possível às situações seguintes:

1. C = 0, para cidades de porte médio e áreas suburbanas.
2. C = 3, para grandes centros urbanos.

O termo "a" é o mesmo utilizado nas equações 3.2 a 3.4 e abrange os tipos de área urbana ou suburbana possíveis.

Na equação 6.11 utilizada aparece um fator de ajuste "C" que é um parâmetro de ajuste referente ao tamanho da área de urbanização avaliada. Para o nosso caso seu valor é zero. Os resultados obtidos são bem próximos aos obtidos com o modelo do CCIR e com a vantagem da não dependência do parâmetro subjetivo B_1 , percentagem de edificações sobre o terreno, informação essa que não é tão simples de se obter na prática.

Apesar de obtermos resultados coerentes a partir de distâncias de 250 metros, valores menores de distância continuam apresentando resultados muito diferentes dos esperados no modelo de propagação avaliado. Tanto nos modelos anteriores como nesse, os problemas de condições de frequência, distância ERB $\longleftrightarrow$ Cliente e altura da antena ERB estão fora dos valores propostos no modelo. Isso reforça a justificativa a necessidade de um modelo específico para a rede sem fio de computadores.

6.1.4 Comparação com o Okumura-Hata modificado

O modelo de Okumura-Hata modificado acrescenta diversos parâmetros de correção para o modelo de Okumura-Hata visando melhorar a sua exatidão e ampliar a faixa de validade do modelo (Distância da ERB, Frequência, etc). Na Figura 6.9 são mostrados os valores obtidos. Apesar das modificações de ajuste do modelo, fazendo com que o caso avaliado neste trabalho

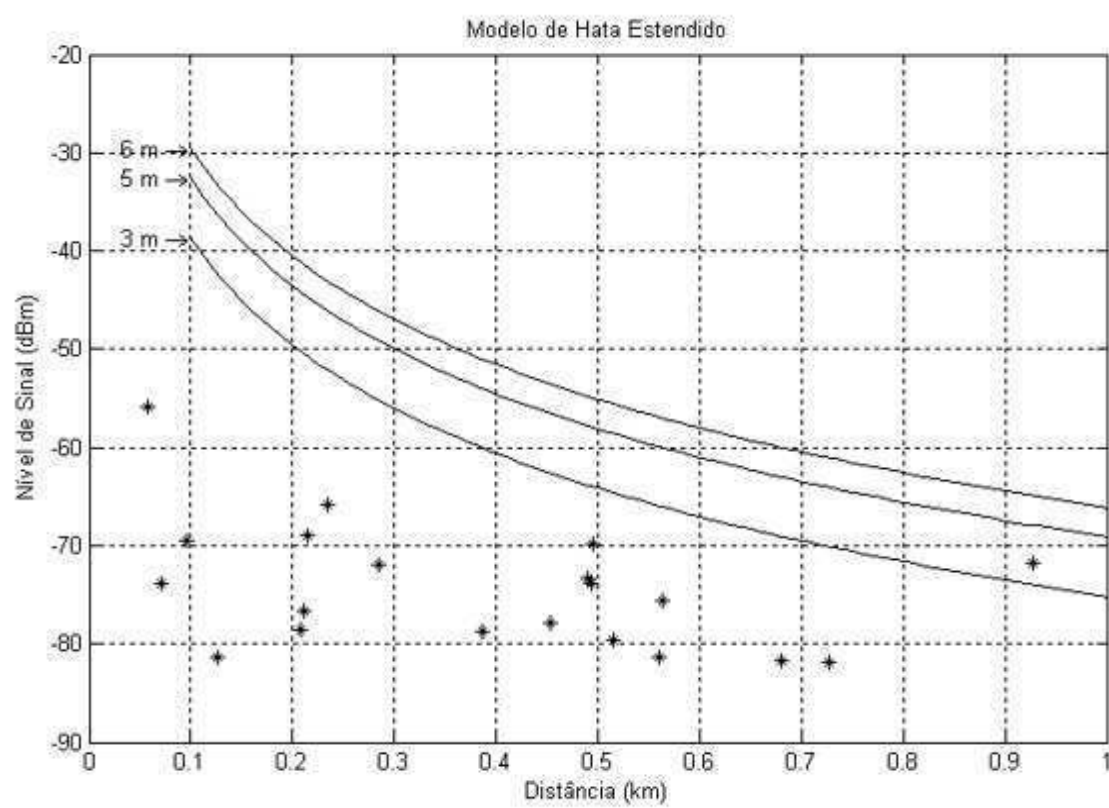


Figura 6.8: Curvas obtidas no Modelo de Hata Estendido

esteja dentro da faixa de validade de frequência, os resultados simulados são excessivamente baixos comparados aos valores medidos. No entanto, esse fato ocorre devido aos fatores de correção dependentes da frequência, a_2 e a_4 referente às equações 3.3 e 3.4, respectivamente. Essas duas equações utilizam aproximadamente 200 e 400 MHz. Na situação deste trabalho utilizou-se 2412 MHz. Além disso, as variações na distância e altura da ERB ainda estão fora da faixa de validade do modelo de Hata modificado.

As equações modificadas de Hata são mostradas abaixo:

1. Funções de transição:

$$F_1 = \frac{300^4}{f_c^4 + 300^4} \quad (6.12)$$

$$F_2 = \frac{f_c^4}{300^4 + f_c^4} \quad (6.13)$$

2. Fator de correção da curvatura da terra:

$$S_{ks} = \left[27 + \frac{f_c}{230}\right] \log\left[\frac{17(h_b + 20)}{17(h_b + 20) + R^2}\right] + 1,3 - \frac{|f_c - 55|}{750} \quad (6.14)$$

Onde:

f_c = Frequência 100 - 3000 (MHz)

h_b = Altura efetiva da antena da estação radio base 30 - 300 (m)

h_m = Altura da antena da estação móvel 1 - 10 (m)

R = Distância 1 - 100 (km)

3. O Fator de correção para áreas urbanas / suburbanas pode ser encontrado de:

$$S_o = (1 - U_r)[(1 - 2U_r)L_{po} + 4U_rL_{ps}] \quad (6.15)$$

U : 0 ou 1 / vale zero para cidade pequena ou média e um para centros urbanos

U_r = Área aberta seu valor é zero; Suburbanas seu valor é 0,5 e 1 para áreas urbanas.

L_{po} e L_{ps} são obtidos a partir das equações 3.5 e 3.6.

4. Fator geral de correção da altura da antena móvel:

$$a_x = (1 - U)a + U[a_2F_1 + a_4F_2] \quad (6.16)$$

Aqui o termo a é a equação 3.2 e os termos a_2 e a_4 se referem às equações 3.3 e 3.4, respectivamente.

5. O Fator da porcentagem de prédios sobre o terreno, é o mesmo da equação 6.8:

$$B_o = 25 \log(B_1) - 30 \quad (6.17)$$

Onde:

B_1 tem valor de 0,5 para áreas suburbanas e 1 para áreas urbanas.

Assim, a perda média de propagação é dada por:

$$L_{mh} = -(L_p + S_o + a_x + S_{ks} + B_o) \quad (6.18)$$

6.1.5 Comparação com o Modelo de Walfisch-Bertoni

As equações do modelo de Walfisch-Bertoni são mostradas a seguir e as perdas totais foram obtidas pela soma de L_0 (perdas no espaço livre), L_{ex} (perdas excedentes no caminho de propagação) e G_t (ganhos das antenas e perdas nos cabos e conectores).

$$L_o = 32,4 + 20 \log f_c + 20 \log R \quad (6.19)$$

e

$$L_{ex} = 57,1 + A + \log f_c + 18 \log R - 18 \log H - 18 \log \left[1 - \frac{R^2}{17H}\right] \quad (6.20)$$

O último termo é a parcela A da curvatura da terra e o valor de A é dado por:

$$A = 5 \log \left[\left(\frac{d}{2} \right)^2 + (h - h_m)^2 \right] - 9 \log d + 20 \log \left\{ \arctan \left[\frac{2(h - h_m)}{d} \right] \right\} \quad (6.21)$$

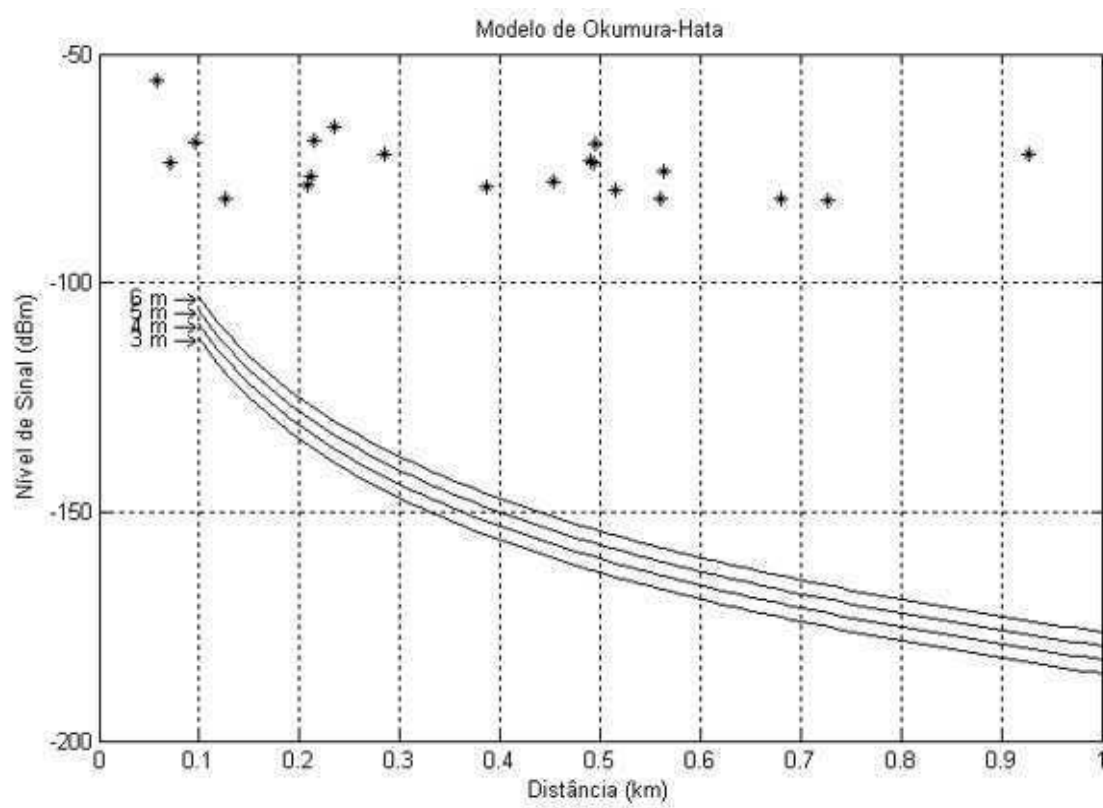


Figura 6.9: Curvas obtidas no Modelo de Hata Modificado

Nas equações consideramos a altura média das edificações como sendo 5 metros. A largura média das ruas também foi considerada com sendo de 5 metros.

A altura das antenas dos clientes foi considerada com valores de: 3, 4, 4.9 e 6 metros.

Na Figura 6.10 são ilustrados os resultados para o modelo de Bertoni. Para $h_m = 3, 4$ e $4,9$ os valores do parâmetro "A" foram $-4,6544$, $-10,381$ e $-30,2712$ respectivamente. O último termo da equação ((6.21) que determina o parâmetro "A", possui uma diferença $(h - h_m)$ que significa a diferença entre a altura média das edificações (aqui consideradas como 5 metros) e a altura da antena cliente. Assim o termo citado se aproxima de zero quando usamos valores próximos de 5 metros. No caso, utilizamos um valor de 4,9 metros para h_m e com isso o valor do arco-tangente também se aproximou de zero. Isso faz com que o logaritmo, também presente, tenha seu valor tendendo para $+\infty$. Por isso no gráfico obtido o valor para a altura da antena cliente de 4,9 metros tem um valor tão discrepante dos outros valores. Para $h_m = 6$ metros, o valor do arco-tangente é um valor negativo e o resultado do logaritmo é um numero complexo. Assim, consideramos, nesse caso, o valor do parâmetro A como sendo igual a zero. Desprezar o valor de A é algo possível e coerente na nossa situação porque este parâmetro determina a componente de perda do sinal entre o topo do edifício e a região próxima ao solo. Essa situação não é a avaliada neste trabalho tendo em vista que a antena cliente esta sempre no topo da edificação e com visada direta com a ERB.

Na Figura 6.10 observamos que o modelo de Bertoni apresenta os melhores resultados até o momento, para quase toda a faixa de distância avaliada. Os valores fora da curva ocorrem devido as variações presentes nos equipamentos e cabos utilizados nas medições.

6.1.6 Comparação com o Modelo Walfish-Ikegami (COST 231)

O modelo COST 231 na situação de LOS (line-of-sight) utiliza as equações abaixo:

$$L_{LOS} = L_{fs} + 10,19 + 6 \log R \quad (6.22)$$

onde:

$$L_{fs} = 32,45 + 20 \log R + 20 \log f_c \quad (6.23)$$

Os resultados apresentados na Figura 6.11 demonstram resultados bem acima dos valores medidos. Assim, realizamos também comparações utilizando o modelo em NLOS, descrito pelas equações a seguir e resultados apresentados na Figura 6.12.

Nesta situação as equações utilizadas foram:

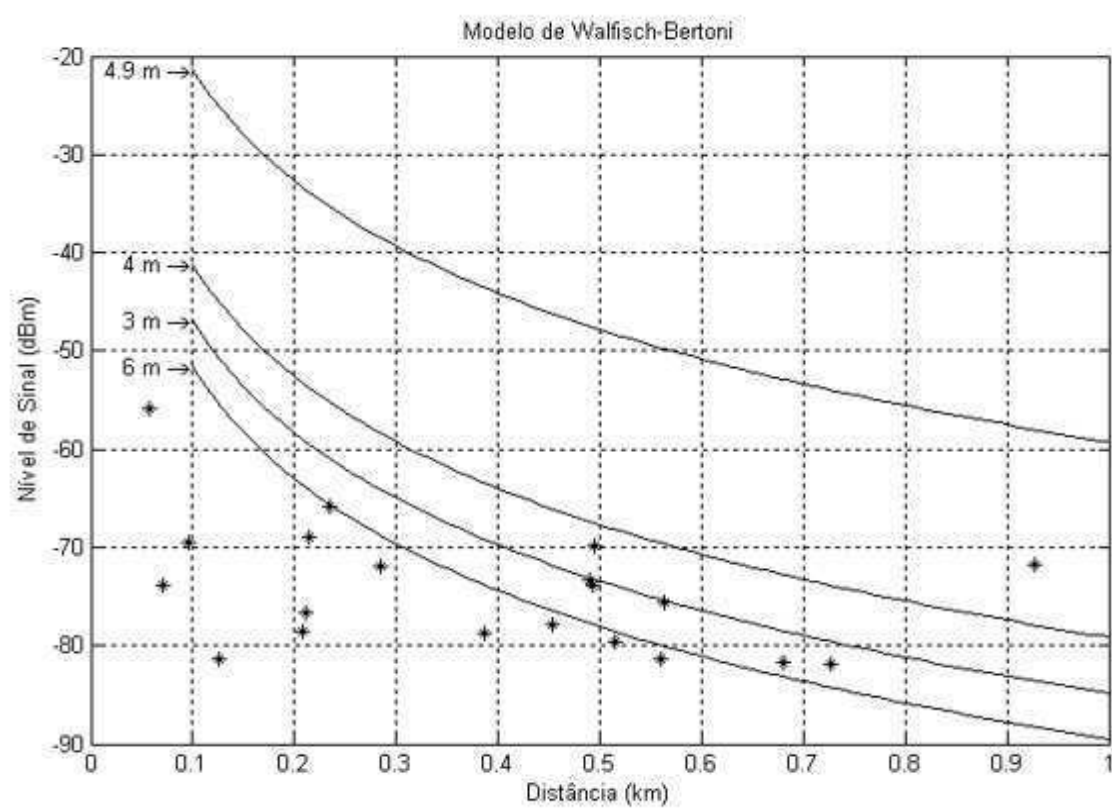


Figura 6.10: Curvas obtidas no Modelo de Walfisch-Bertoni

$$L_{NLOS} = L_{fs} + L_{rts} + L_{mds} \quad (6.24)$$

Em que:

$$L_{rts} = -16,9 - 10 \log w + 10 \log f_c + 20 \log \Delta h_m + L_{ori} \quad (6.25)$$

e

$$L_{msd} = L_{bsh} + k_a + k_d \log R + k_f \log f_c - 9 \log d \quad (6.26)$$

onde:

O termo L_{bsh} é a perda por sombreamento, dada pela equação:

$$L_{bsh} = -18 \log(1 + \Delta h_b) \quad \text{para } \Delta h_b > 0 \quad (6.27)$$

para

$$k_a = 54 \quad (6.28)$$

e

$$k_d = 18 \quad (6.29)$$

O fator da frequência, k_f , é definido, segundo a densidade de ocupação (população e/ou edificações), como a seguir:

$$k_f = -4 + 0,7 \left(\frac{f_c}{925} - 1 \right) \quad (6.30)$$

Os dois últimos termos da equação 6.25 são igualados a zero. O L_{ori} se refere à componente de perdas entre o topo do edifício e o nível do solo que não é a situação deste trabalho. O penúltimo termo, Δh_m altura da ERB abaixo do nível médio das edificações, também está fora do caso estudado neste trabalho.

Na Figura 6.12 são apresentadas curvas com valores obtidos com a separação entre edificações $d = (d_1, d_2, d_3, d_4) = (35, 30, 25, 20)$ metros. Na largura da rua utilizou-se os valores $w = (w_1, w_2, w_3, w_4) = (17, 15, 12.5, 10)$ metros.

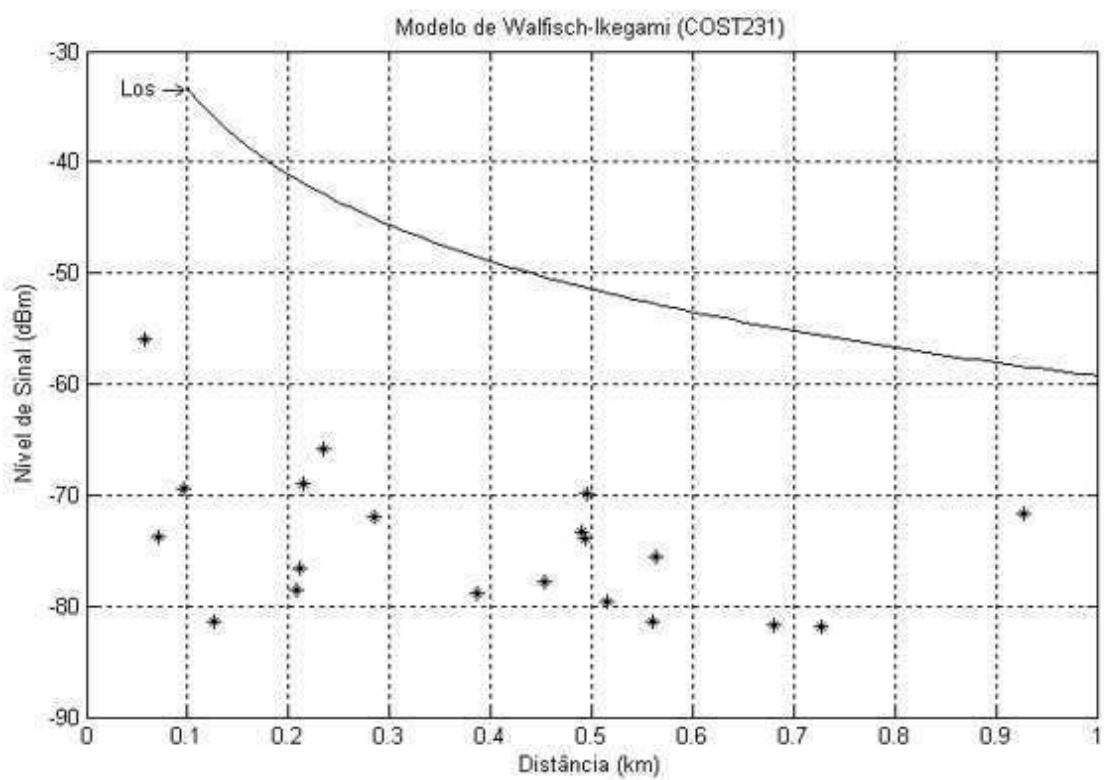


Figura 6.11: Curvas obtidas no Modelo de COST 231 em LOS

Os resultados na situação de NLOS foram melhores que na situação de LOS. Para distâncias muito pequena (menor que 200 metros) os resultados foram poucos satisfatórios. Para distâncias acima desse valor e com $d_4 = 20$ metros e $w_4 = 10$ metros os valores obtidos na simulação, apresentam o mesmo comportamento de decaimento com a distância que os dados obtidos. Deve-se lembrar que a precisão do GPS e a falta de dados mais concretos sobre a largura da rua e separação dos edificações dificulta a obtenção de dados mais exatos.

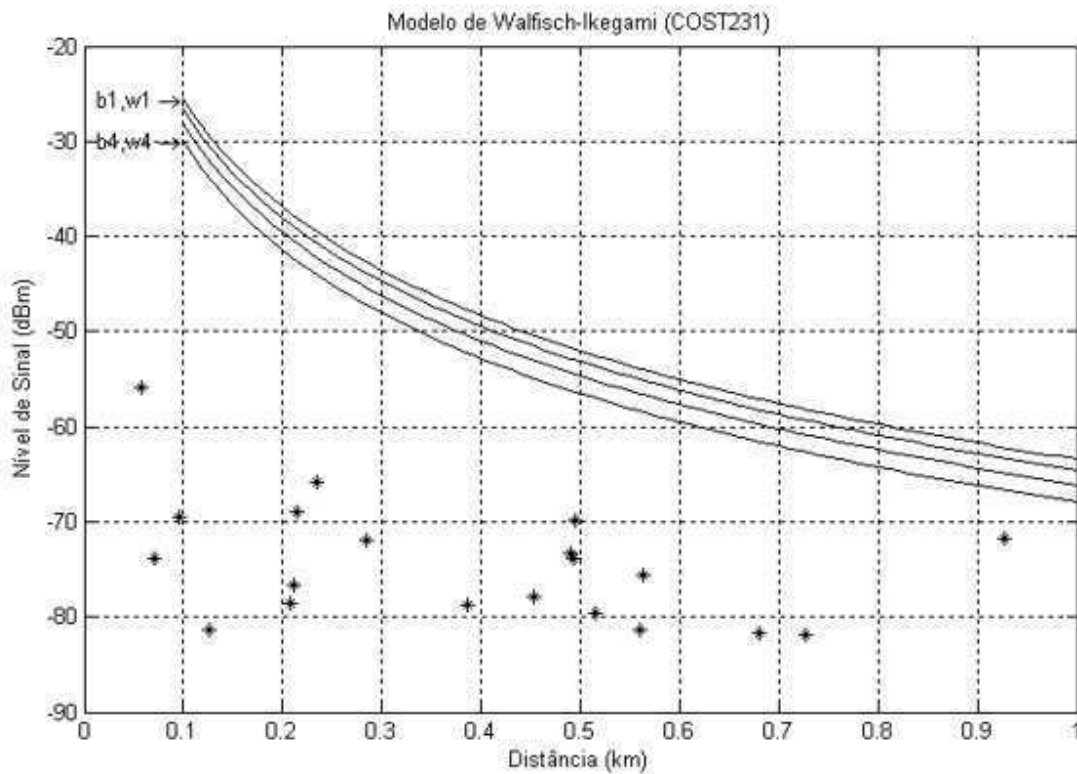


Figura 6.12: Curvas obtidas no Modelo de COST 231 em NLOS

6.1.7 Comparação com o Modelo Maciel-Bertoni-Xia

O modelo de Marciel-Bertoni-Xia é o próximo modelo a ser analisado e comparado com os resultados das medições. As perdas de propagação são encontradas pela soma das perdas no espaço livre, L_o , das perdas excedentes L_{ex} e do ganho G_t . As equações utilizadas neste modelo estão mostradas abaixo.

$$L_o = -10 \log\left[\left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2\right] \quad (6.31)$$

$$L_{ex} = L_{e1} + L_{e2} \quad (6.32)$$

O termo L_{ex} é composto pela soma de L_{e2} e L_{e1} . No entanto L_{e1} é a parcela referente à queda no nível de sinal entre o topo da edificação e o nível do solo. Por isso, na situação deste trabalho, esse termo terá valor zero. L_{e2} é dado pela equação a seguir:

$$L_{e2} = -10 \cdot \log(G_2 Q^2) \quad (6.33)$$

com

$$g_p = \alpha \sqrt{\frac{d}{\lambda}} \quad (6.34)$$

onde

$$\alpha = \arctan \frac{h_b - h}{R} \approx \frac{h_b - h}{R} \quad (6.35)$$

No modelo de Maciel-Bertoni-Xia, Q pode ser encontrado por:

$$Q = 3,50g_p - 3,327g_p^2 + 0,962g_p^3 \quad \text{para } 0,01 < g_p < 1 \quad (6.36)$$

Na Figura 6.13 temos o resultado da simulação para uma altura da antena cliente de 3 metros. A curva que representa o resultado das perdas tem uma inclinação decrescente e isso apresenta uma rápida queda com a distância. Observando a figura 6.13 apenas na região entre 490 e 750 metros e somente alguns valores é que o modelo aparenta alguma coerência com as medições. No entanto, o comportamento da curva, como um todo, indica um decaimento do nível do sinal bem diferente dos dados coletados.

A Figura 6.14 apresenta os resultados das curvas obtidas para alturas das antenas clientes de 3, 4 e 5 metros. Coincidentemente, as curvas são muito próximas uma das outras e fica pouco perceptível de distinção na escala utilizada. No restante o gráfico apresentou comportamento semelhante ao gráfico anterior. Ressaltamos mais uma vez que o modelo não se aplica a distâncias menores que 1 km.

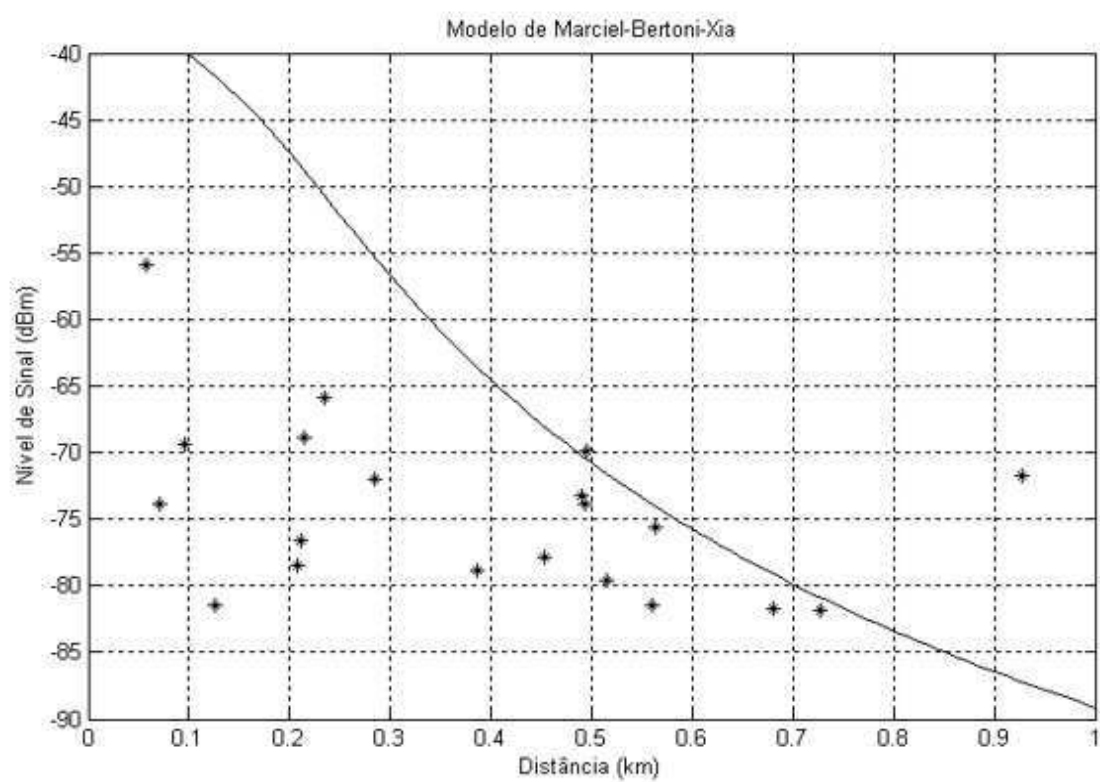


Figura 6.13: Curvas obtidas no Modelo de Marciel-Bertoni-Xia $h_m = 3m$

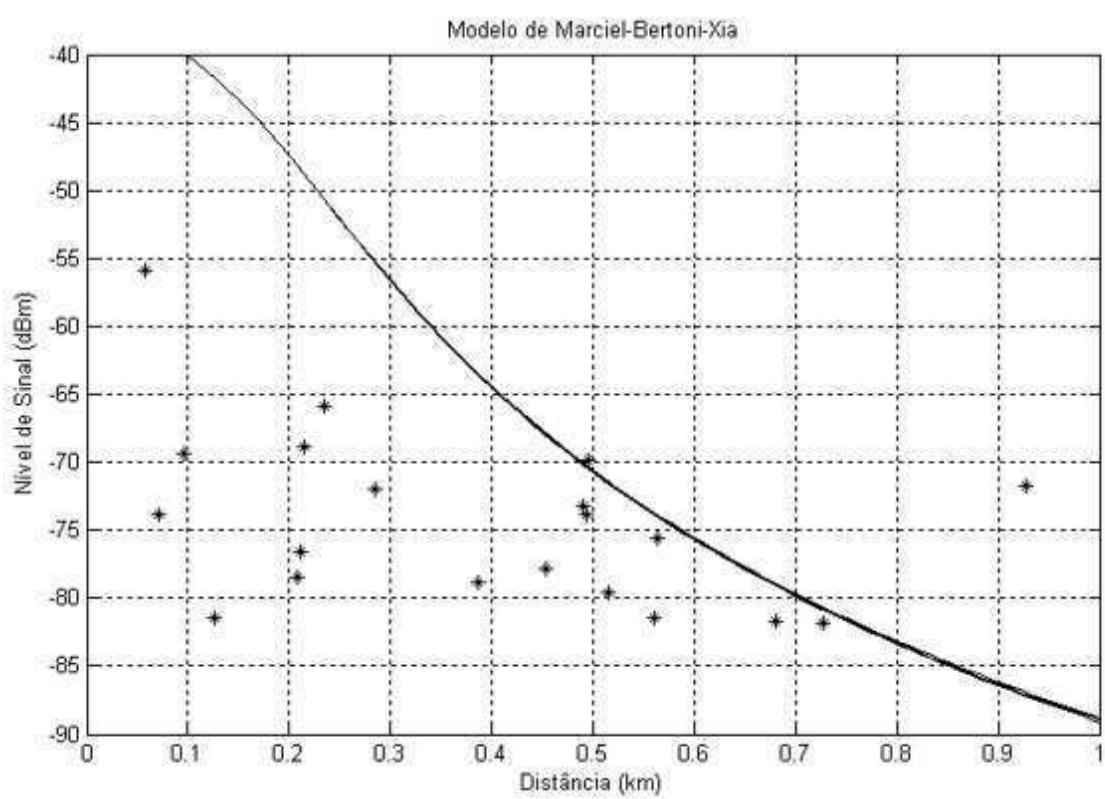


Figura 6.14: Curvas obtidas no Modelo de Marciel-Bertoni-Xia

6.1.8 Comparação com o Modelo simplificado Xia

No modelo simplificado de Xia seguimos o mesmo procedimento para obtenção dos resultados. As equações utilizadas são apresentadas logo abaixo.

$$L = L_{fs} + L_{rts} + L_{md} \quad (6.37)$$

Onde:

$$L_{fs} = -10 \log\left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 \quad (6.38)$$

λ é o comprimento de onda e R a distância entre transmissor e receptor

$$L_{rts} = -10 \log\left[\frac{\lambda}{2\pi^2 r} \left(\frac{1}{\phi} - \frac{1}{2\pi + \phi}\right)\right] \quad (6.39)$$

Em que:

$$\phi = \arctan\left(\frac{\Delta h_m}{x}\right) \quad (6.40)$$

e

$$r = \sqrt{(\Delta h_m)^2 + x^2} \quad (6.41)$$

Δh_m é a diferença de alturas entre o nível médio das edificações e a estação móvel.

w é a largura da rua.

x em geral é w/2.

E

$$L_{md} = -10 \log(Q^2) \quad (6.42)$$

Onde o valor de Q vale:

$$Q = 2,35 \left(\frac{g_p}{M}\right)^{0,9} \approx 2,35 \left(\frac{\Delta h_b}{R} \sqrt{\frac{d}{\lambda}}\right)^{0,9} \quad (6.43)$$

Assim, a perda total é dada por:

$$L = -\log\left[\left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2\right] - 10\log\left[\frac{\lambda}{2\pi^2 r}\left(\frac{1}{\phi} - \frac{1}{2\pi + \phi}\right)\right] - 10\log\left[(2,35)^2\left(\frac{\Delta h_b}{R}\sqrt{\frac{d}{\lambda}}\right)^{1,8}\right] \quad (6.44)$$

O termo L_{rts} tem o mesmo significado do termo L_{e1} do modelo anterior. Ou seja, seu valor será igual a zero. Fazendo isso, obrigatoriamente não serão considerados os valores da largura da rua, mas apenas a distância média entre edificações.

No modelo simplificado de Xia pode se escolher uma das três condições: ERB abaixo do nível médio das edificações, ERB numa altura próxima do nível médio das edificações e ERB acima do nível médio das edificações. Aqui foi analisada apenas o último caso.

O parâmetro da distância entre as edificações d foi adotado como sendo 5 metros nos resultados da Figura 6.15 e como 10 metros na Figura 6.16. Em ambos, a altura média da antena cliente foi considerada como sendo 6 metros.

O principal parâmetro alterado, aqui, foi a altura média das edificações com valores adotados como 4 m, 5 m e 5,9 metros. O último valor foi escolhido por causa da diferença entre a altura da antena cliente e do nível médio das edificações que se aproxima de zero e isso faz com que o logaritmo, onde está a diferença, tenda para um valor mais alto.

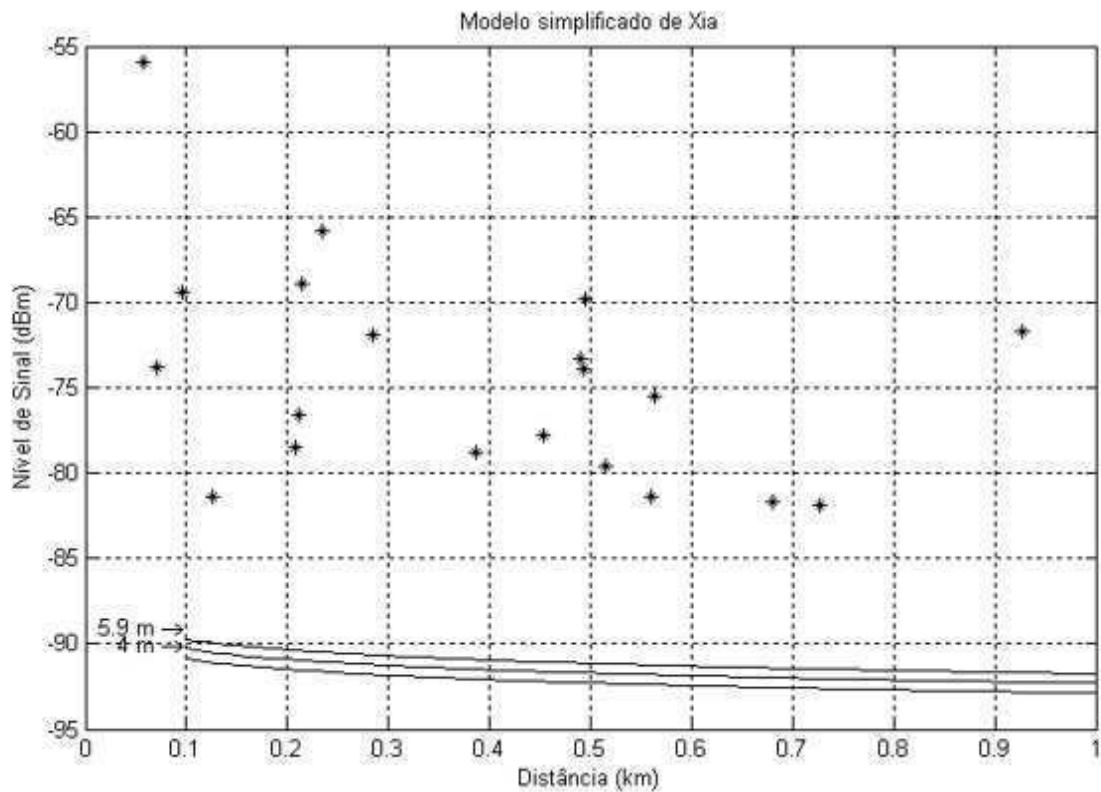
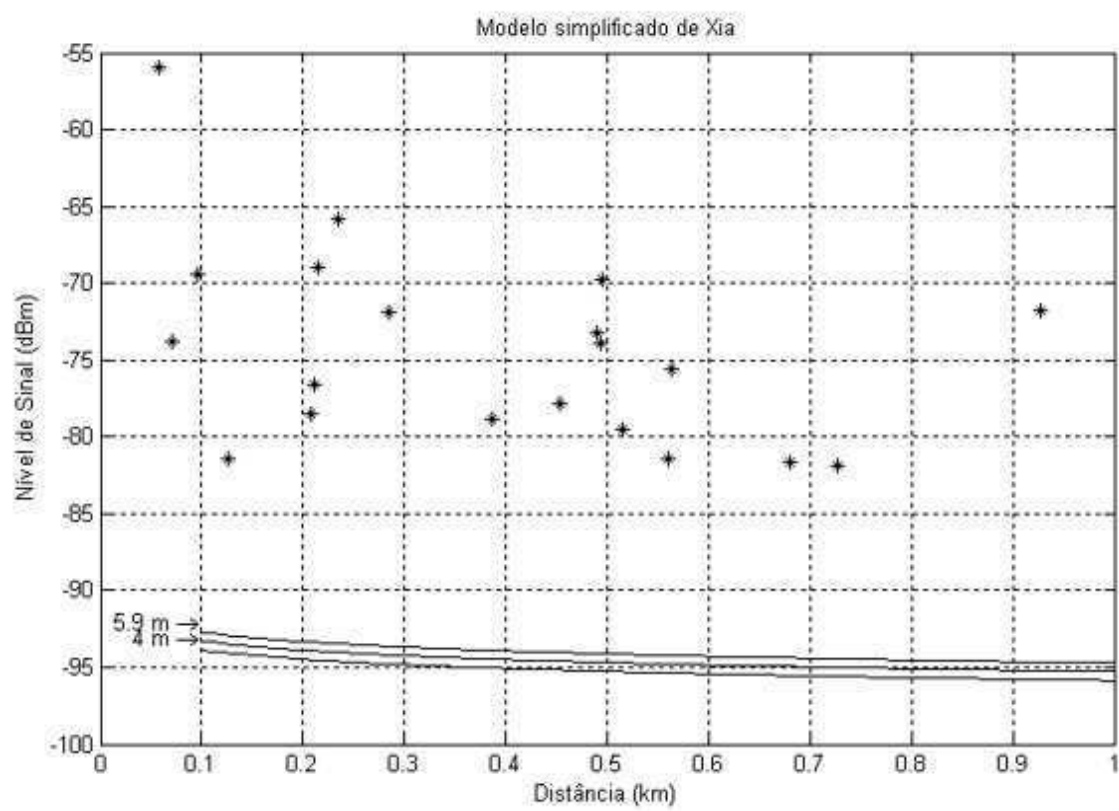


Figura 6.15: Curvas obtidas no Modelo simplificado de Xia p/ $d = 5\text{m}$

Figura 6.16: Curvas obtidas no Modelo simplificado de Xia $p/d = 10\text{m}$

Analisando os resultados para o nível médio das edificações como sendo 4, 5 e/ou 5.9 metros, verificamos que o modelo apresenta uma perda maior que os valores medidos. Apesar dos valores adotados para a distância entre as edificações serem 5 e 10 metros, estes valores, para a cidade avaliada são coerentes e bastante próximos da realidade encontrada, apesar de não podermos afirmar que não seja necessária uma verificação mais aprofundada desse valor. Os valores medidos apresentam diferenças dos valores simulados devido a forte dependência das equações com o termo que foi desconsiderado. Esse termo determina a parcela do sinal que chega a estação móvel ao nível do solo. Como a situação avaliada aqui, a antena está situada no topo da edificação, não há necessidade do termo que dá as perdas do sinal do topo ao nível do solo. A flutuação nos valores medidos são justificáveis porque cada uma das medidas realizadas da altura da antena foi um valor aproximado e os dados do GPS sobre posição e altura tinha uma precisão média de 9,12 metros apesar de que o comprimento do cabo (real) não deixar muita margem no erro da altura da antena cliente. A flutuação dos valores medidos é difícil de se evitar pela própria aleatoriedade das medidas. As perdas nos cabos, considerada como uma perda média no parâmetro G_t , se considerada de forma mais realista, seria diferente, pois cada usuário possui um comprimento de cabo diferente.

6.1.9 Comparação com o Modelo de Bertoni adaptado

O modelo de Bertoni adaptado é baseado no modelo de Bertoni com a modificação do termo Q (amplitude do sinal). Isso foi feito com o objetivo de se introduzir as perdas originadas pela aleatoriedade das alturas das edificações no caminho de propagação. As equações utilizadas são reapresentadas a seguir para maior facilidade.

Para um g_p dado pela equação a seguir:

$$g_p = \sin \alpha \sqrt{\frac{d}{\lambda}} \quad (6.45)$$

Temos que:

$$Q_{Ran} = 2,616g_p - 2,313g_p^2 + 0,605g_p^3 \quad (6.46)$$

O índice (Ran) reforça que foram utilizadas alturas aleatórias nas edificações entre 6m e 14 m.

Para antenas isotrópicas o "ganho no percurso" é dado por:

$$PG = \frac{P_{Rx}}{P_{Tx}} = \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 Q^2 \quad (6.47)$$

Em que:

R é a distância entre ERB e cliente.

$$\alpha = \arctan\left(\frac{h_{Tx}}{R}\right) - \frac{R}{2R_e} \quad (6.48)$$

Onde:

$R_e = 8490$ km, raio efetivo da terra, h_b é a altura da antena transmissora.

A equação 6.48 não é válida para distâncias muito próximas ou além da linha do horizonte, $\alpha = 0$.

A altura média das edificações foi adotada como sendo 5 metros. E as distâncias médias entre as edificações foram 5 m, 7 m e 15 metros. Os resultados estão na Figura 6.17.

Os resultados obtidos no modelo foram bem abaixo dos valores medidos, com exceção dos valores iniciais. Uma boa justificativa para essa diferença seria a mudança do parâmetro Q , proposto para diferenças aleatórias nas alturas das edificações. Na situação do modelo temos prédios de poucos a vários andares, fato que não ocorre na cidade onde se realizaram as medições.

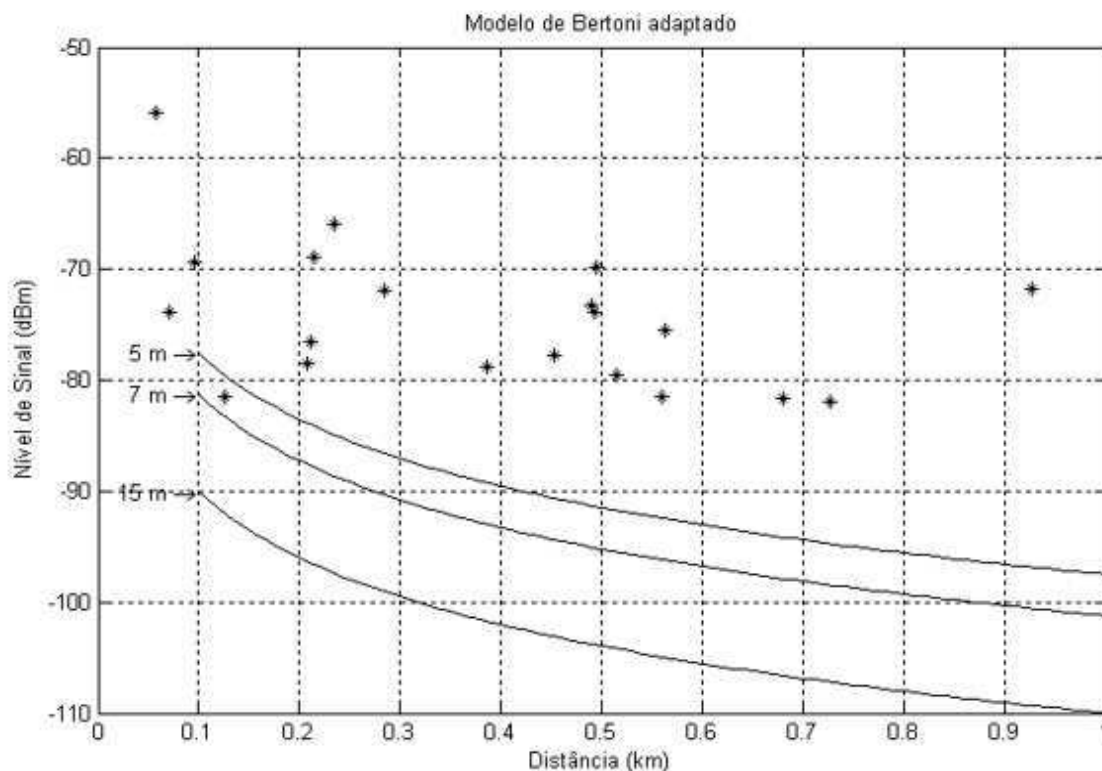


Figura 6.17: Curvas obtidas no Modelo de Bertoni adaptado

6.1.10 Comparação com o Modelo de Crosby

O modelo de Crosby consiste na modificação do parâmetro g_p que passa a ser descrito como g'_p para uma função dependente de outro parâmetro γ que é função do comprimento de onda, da distância entre edificações e do desvio padrão das alturas das edificações.

As equações utilizadas e os resultados são mostrados logo a seguir:

$$L_{md} = -20 \log Q \quad (6.49)$$

Em que:

$$Q = 3,50(g'_p) - 3,327(g'_p)^2 + 0,962(g'_p)^3 \quad (6.50)$$

Com o parâmetro adimensional (g'_p) dado por

$$(g'_p) = \frac{\alpha}{(1 + 4,88\gamma + 2,88\gamma^2)^{0,556}} \sqrt{\frac{d}{\lambda}} \quad (6.51)$$

em que

$$\gamma = \frac{\sigma_h^2}{\lambda d} \quad (6.52)$$

e

$$\sigma_h = \frac{\Delta_h}{\sqrt{12}} \quad (6.53)$$

Onde:

$\Delta_h = 0, 1, 3, 5, 7$ e 9m ;

Altura do transmissor entre 10 e 40 m ;

$d = 50 \lambda$ até 1000λ .

Na distância de separação média entre as edificações foi utilizada 5 metros. Nas duas curvas do gráfico da Figura 6.18 são representados dois valores diferentes para Δh_m (3 e 5), variação entre a altura máxima e mínima das antenas clientes.

O resultado apresentado foi bastante coerente para boa parte dos pontos obtidos, na situação para $\Delta h_m = 3$, apesar dos valores estarem fora da curva descrita pelo modelo devido a aleatoriedade das medições. Não podemos esquecer, como já descrito no modelo simplificado

de Xia, que existe a precisão do GPS de 9,12 m. Os valores do comprimento do cabo que foi considerado com um tamanho médio de 10 metros (antena ao equipamento de medida) quando na realidade os tamanhos reais não foram os mesmos. A altura da antena cliente que apresenta valores aproximados. E a separação média entre as edificações de 5 metros que também necessita de uma avaliação mais exata.

As curvas do modelo de Crosby sugerem a possibilidade da utilização do modelo para descrever o comportamento das perdas de propagação com a distância. Esse modelo seria uma boa opção, ao lado do modelo de Walfisch-bertoni, de projeto de uma ERB para situações semelhantes à situação avaliada neste trabalho.

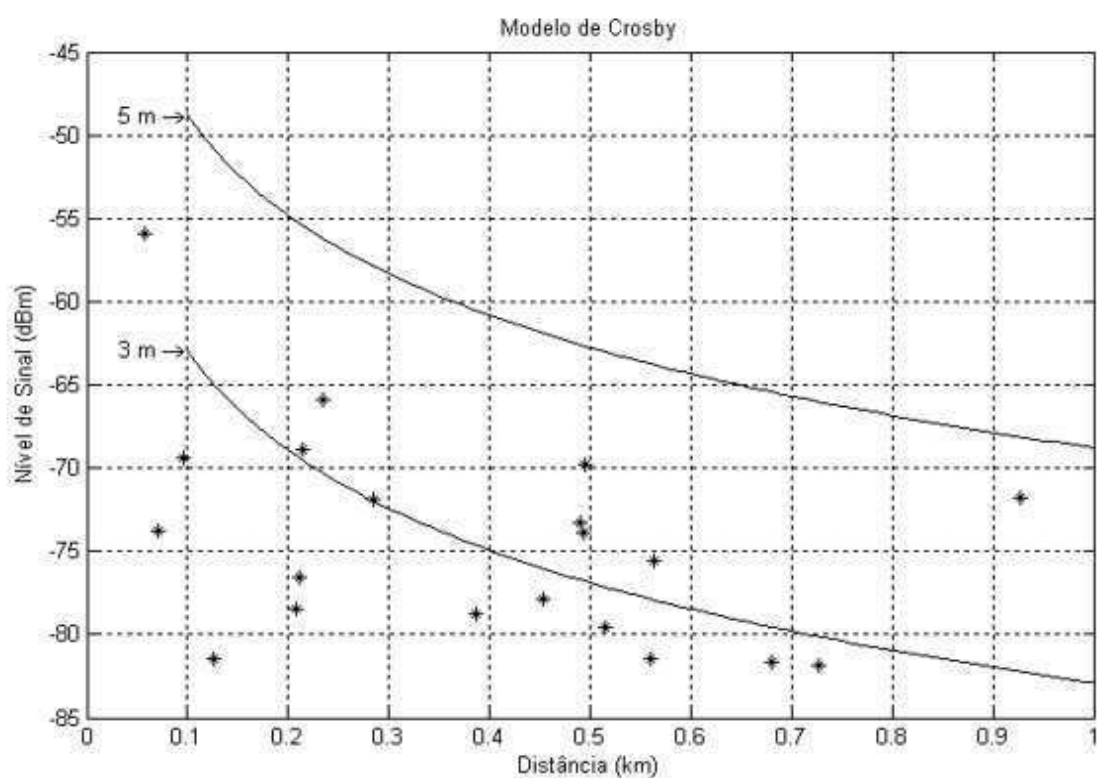


Figura 6.18: Curvas obtidas no Modelo de Crosby

6.1.11 Comparação com o Modelo de Kitao e Ichitsubo

O modelo de Kitao que na sua forma original possui termos dependentes da largura da rua e da inclinação do raio de propagação entre o topo do edifício e a estação móvel. Na situação deste trabalho o termo de inclinação não seria necessário por não ser exatamente o caso avaliado aqui podendo ser considerado como sendo igual a zero. O termo dependente da largura da rua também

poderia ser considerado como sendo igual a zero devido à dificuldade de obtenção desse valor. O próprio autor, na descrição do seu modelo, afirma que a não consideração dos dois termos citados acima por si já leva a um erro de 6,7 dB na utilização do modelo. Somado a isso temos também as diversas variáveis já mencionadas em situações anteriores e a utilização da altura da antena cliente e da ERB fora da faixa de validade sugerida pelo modelo. O resultado é um modelo com uma curva bem distante dos pontos obtidos na medição e com uma discrepância grande nos valores simulados e os medidos. Esse problema já foi verificado em diversos dos modelos avaliados aqui.

$$L = 42,7 \log(R) - 32,7 \log(h_b) + 20,7 \log(f_c) + 55,4 \quad (6.54)$$

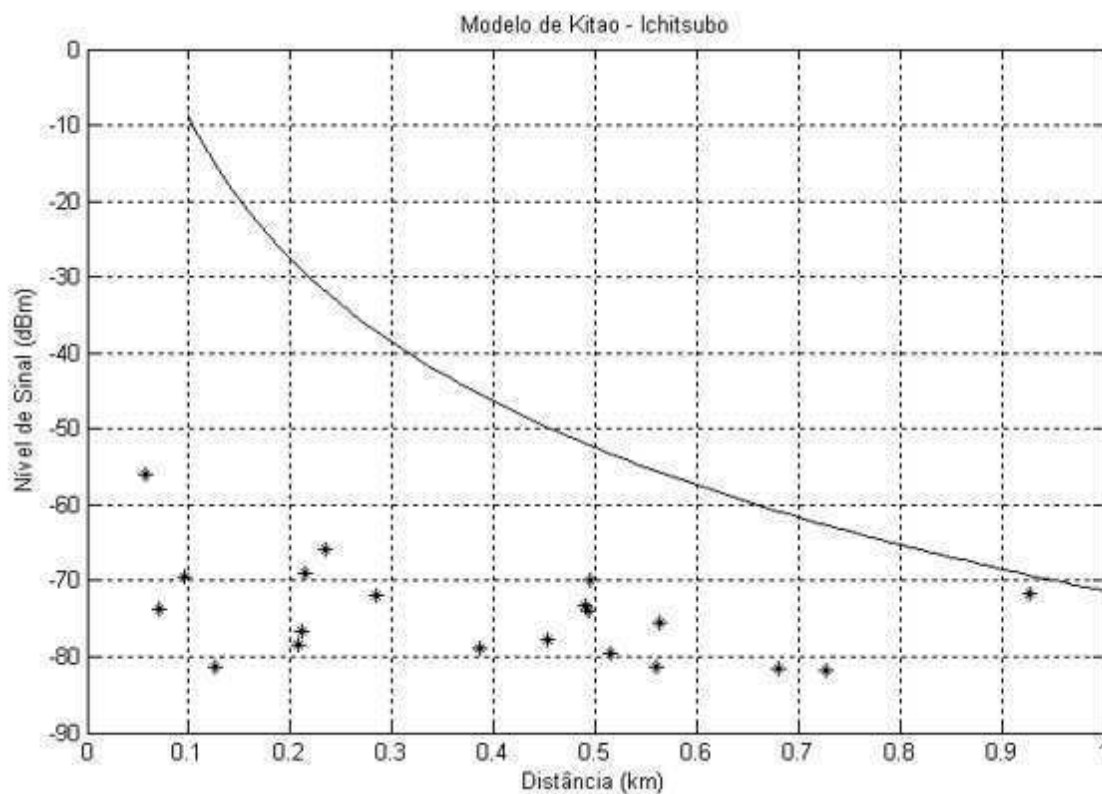


Figura 6.19: Curvas obtidas no Modelo de Kitao-Ichitsubo

A Figura 6.20 ilustra os resultados obtidos com o modelo de Kitao utilizando a equação 6.55 em que a largura da rua (w) possui valores de 5 m e 10 m e o valor para ϕ é zero nos dois casos.

$$L = 42,7 \log(R) - 32,7 \log(h_b) + 20,7 \log(f_c) - 10,3 \log(w) + 13,4 \cos(1,37\phi - 76) + 52,5 \quad (6.55)$$

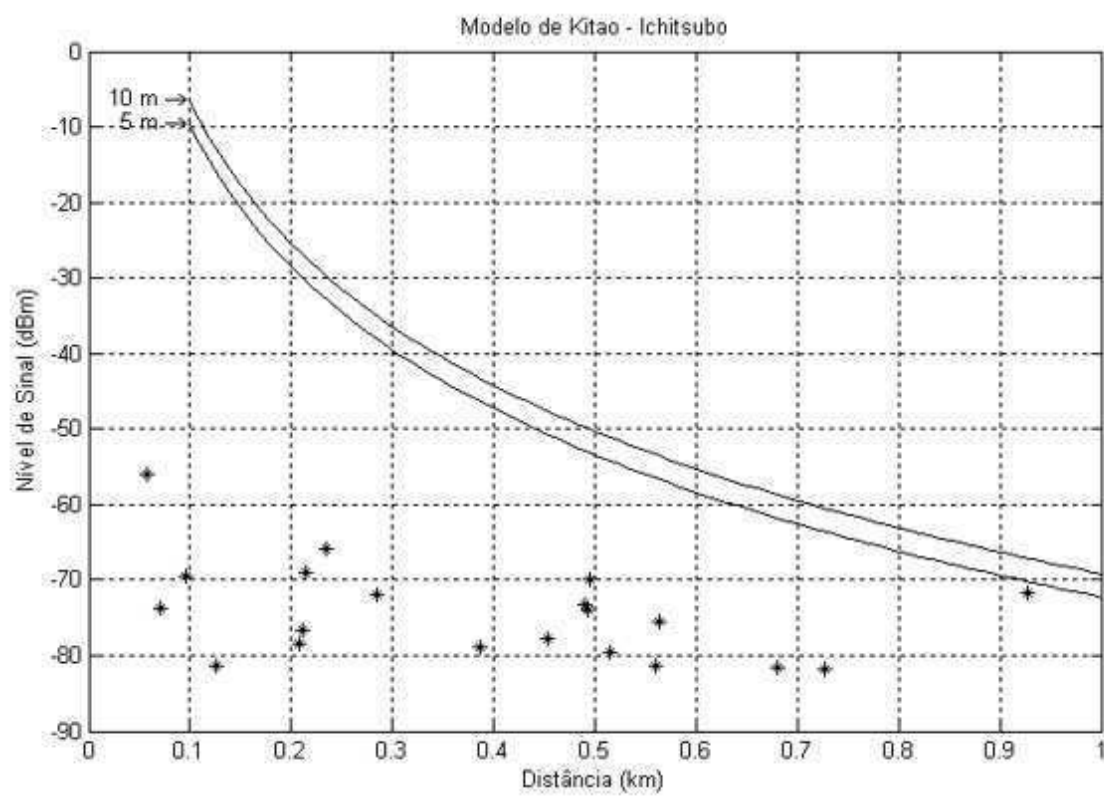


Figura 6.20: Curvas obtidas no Modelo de Kitao-Ichitsubo $c/w = 5$ e 10 m e $\phi = 0$

Observa-se que o resultado obtido após a alteração tem pouca diferença em relação ao resultado anterior, Figura 6.19.

6.1.12 Comparação com o Modelo de Ibrahim - Parsons

O modelo de Ibrahim-Parsons, também chamado de modelo londrino, é descrito pela equação a seguir.

$$L = -20 \log(0,7h_b) - 8 \log(h_m) + \frac{f_c}{40} + 26 \log\left(\frac{f_c}{40}\right) - 86 \log\left(\frac{f_c + 100}{156}\right) \\ + [40 + 14,15 \log\left(\frac{f_c + 100}{156}\right)] \log(1000R) + 0,256(62,4 - 2,2R) \\ - \left(\frac{0,37(-7,475R^2 + 85,225R - 91,55)}{7}\right) \quad (6.56)$$

Onde:

f_c = Frequência de operação na faixa em MHz

R = Distância ERB-EM em km

h_b = Altura da estação rádio base sobre o nível da rua, entre 4 e 50 metros.

h_m = Altura da antena da estação móvel em metros.

Nas curvas da Figura 6.21 são ilustrados os resultados obtidos para 4 alturas diferentes da antena cliente. Os resultados são coerentes com as medidas realizadas apenas na faixa de distância compreendida entre 200 e 400 metros. Fora dessa faixa as curvas tiveram uma diferença grande. Para valores baixos de distância existe um comportamento justificado tanto neste modelo como em alguns dos modelos anteriores devido ao próprio comportamento da função logarítmica para valores próximos da origem. Devemos também incluir as diversas variáveis presentes no ambiente de propagação que são bem diferentes nas cidades avaliadas: uma seria Londres e a outra seria a cidade de Esperança sem grandes edifícios e baixa densidade populacional.

Aliás, essa afirmação pode ser aplicada para os diferentes modelos anteriormente avaliados nesta dissertação.

6.2 Analisando os Resultados - Ponto-a-Ponto

Na segunda parte deste capítulo são descritos e analisados os resultados obtidos nos enlaces de dados entre as cidades. Em seguida é feita a comparação entre os resultados previstos pelos modelos de propagação e os dados obtidos. Os modelos teóricos ponto-a-ponto, além de considerarem a distância e o grau de urbanização, devem considerar o relevo do terreno a

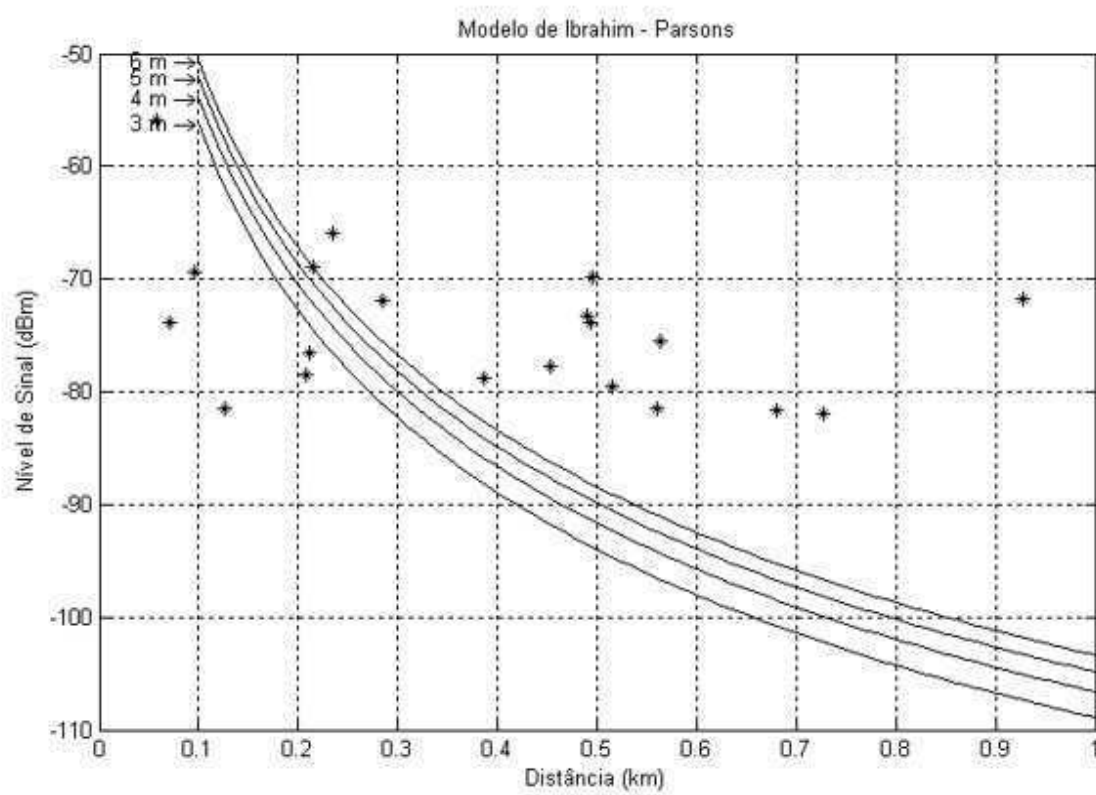


Figura 6.21: Curvas obtidas no Modelo de Ibrahim-Parsons

ser estudado. Os modelos considerados são: Modelo de dois raios, Modelo de Egli, Modelo de Blomquist-Ladell e o Modelo de Lee.

Os enlaces envolvidos, nesta parte são:

- ERB Esperança - ERB Areial.
- Repetidora Esperança - repetidora Areia.
- ERB Campina Grande - repetidora Lagoa Seca.

Cada um desses enlaces está descrito no capítulo anterior.

6.2.1 Enlace ERB Esperança - ERB Areial

Coodenadas	S 07,020200° W 35,85845°
Ângulos θ (rad) (Graus) ϕ (rad) (Graus)	1,69332193094 97,020200° 5,65733729002 -35,85845°
Altura registrada pelo GPS	650,7 m
Precisão do GPS no instante da medição	6,6 m
Altura da antena acima do GPS	4 m
Comprimento aproximado do cabo - Antena / AP	6 m
Raio total	6.378.654,7 m
X_{ERB}	5.130.930,43962 m
Y_{ERB}	- 3.708.506,57864 m
Z_{ERB}	- 779.594,485487 m

Tabela 6.4: Dados obtidos para a ERB (Esperança)

No Anexo F (figura do enlace Esp-Areial) está traçado o perfil do terreno no enlace ERB Esperança - ERB Areial. Ele será utilizado para auxiliar o cálculo das perdas de propagação em cada um dos modelos de predição testados. O traçado do perfil do terreno foi realizado em papel especial (já considerando o valor do fator de correção da terra, aqui, 4/3). Geralmente para se traçar o perfil do terreno, utiliza-se a carta topográfica da região. No entanto, verificou-se que as cartas fornecidas pela ADENE apresentavam discrepâncias entre seus valores e os valores

Coodenadas	S 07,051776432° W 35,9246727°
Ângulos θ (rad) (Graus) ϕ (rad) (Graus)	1,69387304365 97,051776432° 5,65618148586 -35,85845°
Altura registrada pelo GPS	717,8 m
Precisão do GPS no instante da medição	7,8 m
Altura da antena acima do GPS	6 m
Comprimento aproximado do cabo - Antena / AP	12 m
Conectores N - Macho	0
Conectores N - Fêmea	2
SNR	14,10959 dB
Nível de Sinal	- 81,58904 dBm
Nível de Ruído	- 95,69863 dBm
Raio total	6.378.723,80 m
X_{ERB}	5.126.347,53936 m
Y_{ERB}	-3.714.222,04121 m
Z_{ERB}	-783.091,853523 m
Distância	8117,9447 m

Tabela 6.5: Dados obtidos na ERB (Aerial)

Coordenadas Geográficas	Altura	Precisão (GPS)	Distância para ERB
S 07,02041° W 35,85869°	645,8 m	8,9 m	35,11 m
S 07,02439° W 35,86255°	648,7 m	10,1 m	650 m
S 07,03305° W 35,86585°	661,8 m	7,5 m	1650 m
S 07,03910° W 35,87624°	643,5 m	7,0 m	2880 m
S 07,04150° W 35,88543°	667,7 m	6,8 m	3810 m
S 07,04516° W 35,89720°	660,2 m	6,8 m	5100 m
S 07,04784° W 35,91641°	684,4 m	6,8 m	7100 m
S 07,04867° W 35,92369°	701,7 m	6,8 m	7870 m

Tabela 6.6: Dados topográficos obtidos no enlace ERB Esperança - ERB Areal

Transmissor	Ganho / Perda
Ganho da antena em grade (ERB ESP)	24 dB
Perdas nos conectores da ERB (2 unid.)	- 1 dB
Perda no pigtail da ERB (1 unid.)	- 0,5 dB
Perdas no cabo da ERB (6m x -0,252dB)	- 1,512 dB
Ganho do Cartão PCMICIA usado no AP (ERB)	2,5 dB
Potência Transmitida	15 dBm (+/- 2 dB)
Receptor	Ganho / Perda
Ganho da Antena em grade (cliente)	24 dB
Perdas nos conectores do equipamento de medição (4 unid.)	- 2 dB
Perda no pigtail (1 unid.)	- 0,5 dB
Perdas no cabo (aprox. 17m x -0,252dB)	- 4,284 dB
Ganho do Cartão PCMICIA usado na medição	2,5 dB
Total (G_t)	60,204 dB

Tabela 6.7: Composição do valor de G_t para o enlace Esp-Areial

medidos com um GPS durante a realização deste trabalho. Essas discrepâncias se devem a precisão dos equipamentos que realizaram as medições. No caso das cartas, foram utilizados dados de satélites e fotos aéreas da região, para obtenção das cotas do terreno. Assim, os erros das medidas são bem maiores que quando se utiliza uma medição com GPS no local de interesse. Sendo assim, optou-se por realizar as medições com o GPS. O resultado é ilustrado no Anexo F.

Observa-se que o enlace possui o raio principal desobstruído. Porém, na região próxima à cidade de Esperança, existe uma elevação acentuada e esta é a região que deve ser analisada com atenção devido à importância da 1ª Zona de Fresnel.

Comparação com o Modelo de Dois Raios e a Primeira Zona de Fresnel

Neste modelo é necessário considerar o terreno como sendo plano na região do enlace. Essa consideração é válida e coerente. Isso porque a curvatura da terra, em um enlace de dados com essa distância, irá descrever uma corda de curvatura da terra de aproximadamente 0.630 metros, como mostra o cálculo a seguir (BRODHAGE; HORMUTH, 1981).

$$h_t = \frac{d_1 d_2}{12,74K} \quad (6.57)$$

Onde:

h_t = Corda da curvatura da terra (m);

d_1 = Distância da localidade A até o ponto mais alto (km);

d_2 = Distância da localidade B até o ponto mais alto (km);

K = Fator de correção do raio efetivo da terra.

Logo,

$d_1 = 1,65$ km

$d_2 = 6,468$ km

$K = 4/3$

$$h_t = \frac{1,65}{12,74} \frac{6,468}{\frac{4}{3}} = 0,63009 \text{ m} \quad (6.58)$$

Após a consideração da curvatura da terra é feita uma segunda referente às alturas das antenas h_1 e h_2 . Considerando o terreno como plano e com nível de referência em 645 m, as alturas efetivas das antenas em Esperança e Areial serão 9,7 m e 78,8 m, respectivamente.

Assim, utilizando a equação:

$$L_p = -20 \log(h_1) - 20 \log(h_2) + 40 \log(d) \quad (6.59)$$

Teremos uma perda no enlace de:

$$L_p = 98,7119 \text{ (dB)} \quad (6.60)$$

Usando a equação para o cálculo do raio da 1ª zona de Fresnel eq. 3.88 , mostrado a baixo, obtém-se a Figura 6.22 a seguir.

$$R = 17,3 \sqrt{\frac{d_1 d_2}{fd}} \quad (6.61)$$

Onde:

$$d = 8,11794 \text{ km}$$

$$d_1 = 1,650 \text{ km}$$

$$d_2 = 8,11794 - 1,650 = 6,46794 \text{ km}$$

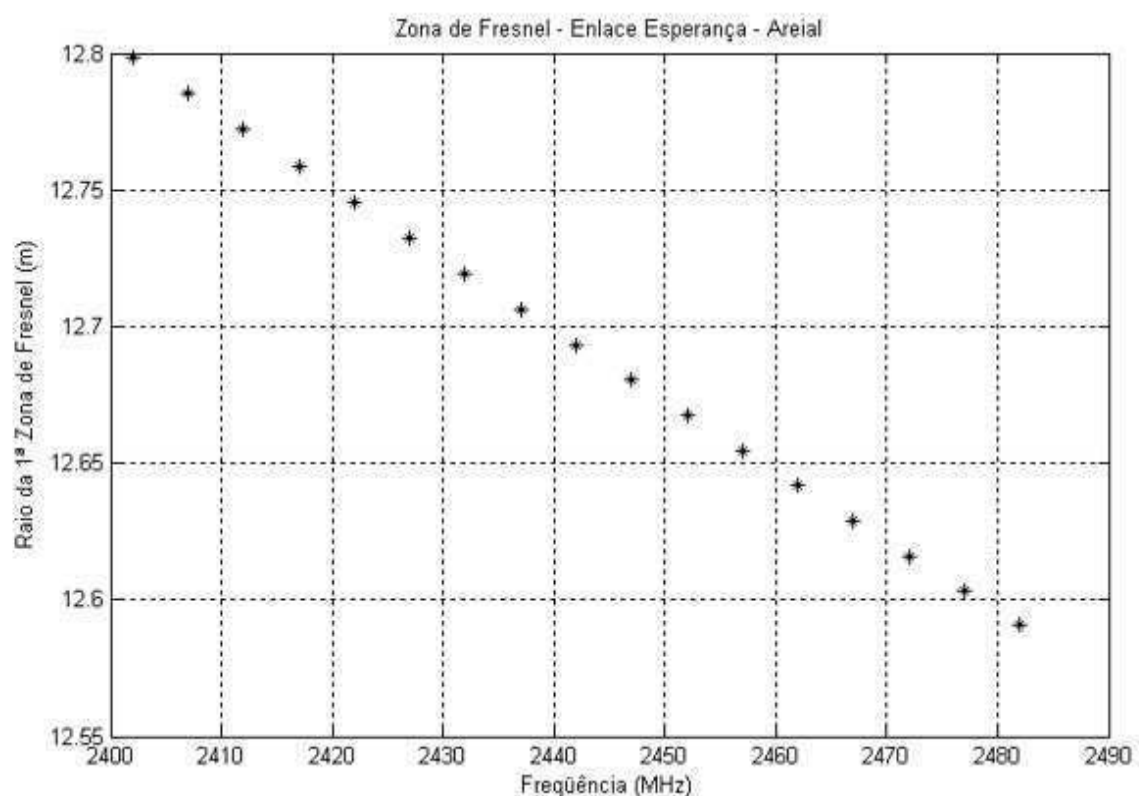


Figura 6.22: Raio da 1ª Zona de Fresnel em função da frequência para o ponto crítico do enlace Esperança - Areial

Observando o enlace desenhado no Anexo F.1, tem-se um valor aproximado para H (Figura G.1) de 4 metros.

Sabendo que no enlace analisado o canal utilizado foi o 11 ($f = 2,462$ GHz e $R = 12,64$ m). Logo, a relação H/R será igual a 0.3164 metros. Assim com $H/R < 0.6$, ou seja, tem-se uma obstrução. Pela figura do enlace, Anexo F.1, temos uma obstrução tipo bordas arredondadas, cuja espessura é maior que $\lambda/10$ (0,01218 m).

Para o cálculo das perdas utiliza-se a equação (3.89) repetida abaixo, equação (6.62):

$$\alpha = \frac{\lambda^{\frac{2}{3}} r^{\frac{1}{3}}}{R} \quad (6.62)$$

Onde:

λ é o comprimento de onda e tem valor 0,1218m

$R = 12,64$ m

r é calculado utilizando as equações (3.90) e (3.91), repetidas abaixo, e como ilustrado no procedimento da Figura (3.13) do capítulo 3.

$$r_i = \frac{1}{2} \frac{(X_i)^2}{Y_i} \quad (6.63)$$

$$r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i \quad (6.64)$$

$X_1 = -50$ m $X_2 = 150$ m $X_3 = -150$ m $X_4 = -350$ m

$Y_1 = 1,8$ m $Y_2 = 1,8$ m $Y_3 = 4,8$ m $Y_4 = 4,8$ m

Logo, das equações (6.63) e (6.64) chega-se a $r = 5512,15$ m.

Assim, $\alpha = 0,343$.

Utilizando as curvas do Anexo G (curvas de perdas para obstáculos convexo), temos que a perda, aproximada, da obstrução é -16 dB.

Assim a perda total prevista para o enlace é:

$$L_t = -16 + 60,204 - 98,7119 = -54,5079 \text{ dB}$$

Os dados obtidos nesse enlace é apresentado na Tabela 6.5. O nível de sinal medido foi de - 81,58904 dBm. O erro entre a predição e o valor medido foi de 49,68% (27,08dB).

Comparação com o Modelo de Egli

Repetindo as mesmas considerações realizadas no modelo anterior, mas utilizando o modelo de Egli para o cálculo das perdas temos:

Primeiro calculamos o valor de β utilizando

$$\beta = \left(\frac{40}{f}\right)^2 \quad (6.65)$$

Onde o valor da frequência varia entre 2402 e 2483 MHz em intervalos de 5 em 5 MHz, seguindo o procedimento semelhante ao utilizado no modelo anterior. Com isso cobrimos todos os onze canais utilizados pelo padrão wi-fi.

Em seguida utilizamos a equação (3.92) sem os parâmetros G_b e G_m . Esses são incorporados quando adicionamos o termo G_t no balanço de potência total do enlace. Na Figura 6.23 observa-se o resultado obtido com o modelo de Egli.

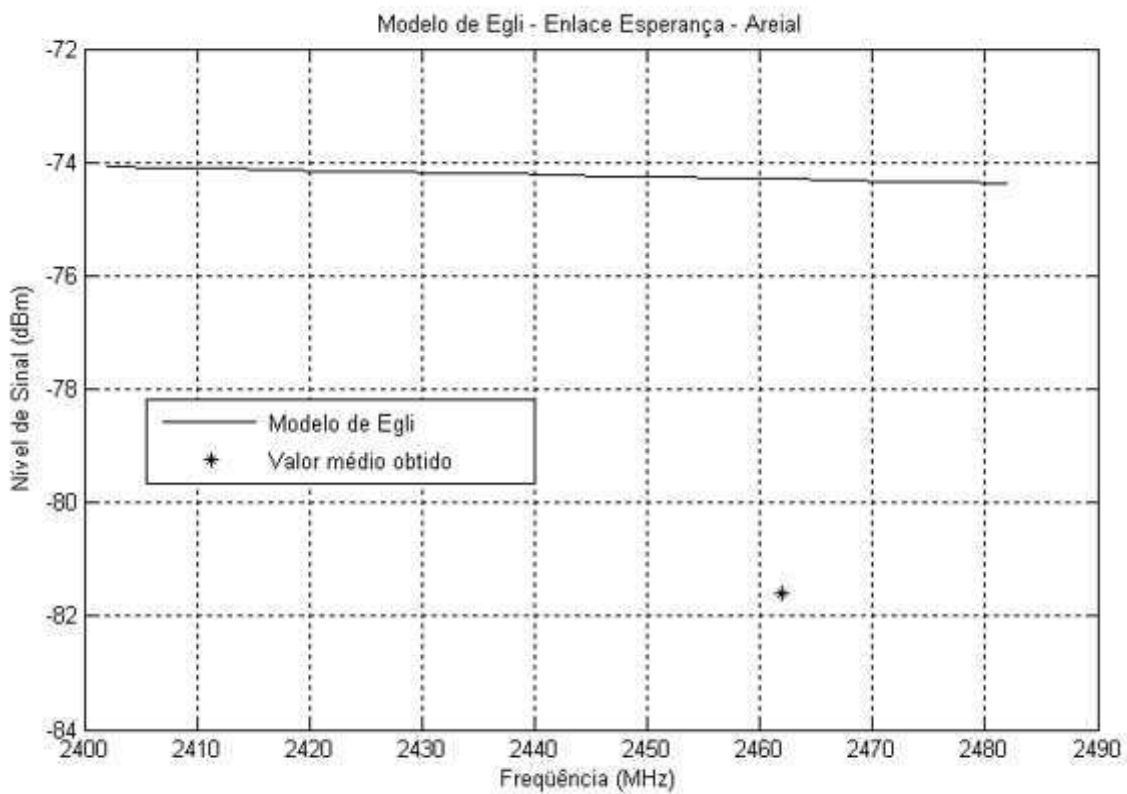


Figura 6.23: Resultados para o Modelo de Egli no enlace Esperança - Areial

O erro cometido utilizando o Modelo de Egli nas perdas de propagação foi de 9,83% (7.2966 dB).

Comparação com o Modelo de Blomquist-Ladell

A equação básica para a perda no percurso é repetida a seguir por conveniência e é dada por:

$$L = L_o + [(L_p' - L_o)^2 + L_D^2]^{\frac{1}{2}} \quad (6.66)$$

Onde:

L_D é a perda devido à difração que ocorre no percurso.

L'_p é a perda de terra plana modificada devido aos efeitos da curvatura da terra e da troposfera.

Para o termo L_D será utilizado o valor de -16 dB calculado no modelo de dois raios para o ponto crítico. Este é o ponto mais provável para a ocorrência da difração. E o termo L'_p poderá ser obtido utilizando a equação de terra plana (3.87) tendo em vista que a influência da curvatura da terra e da troposfera não será considerada.

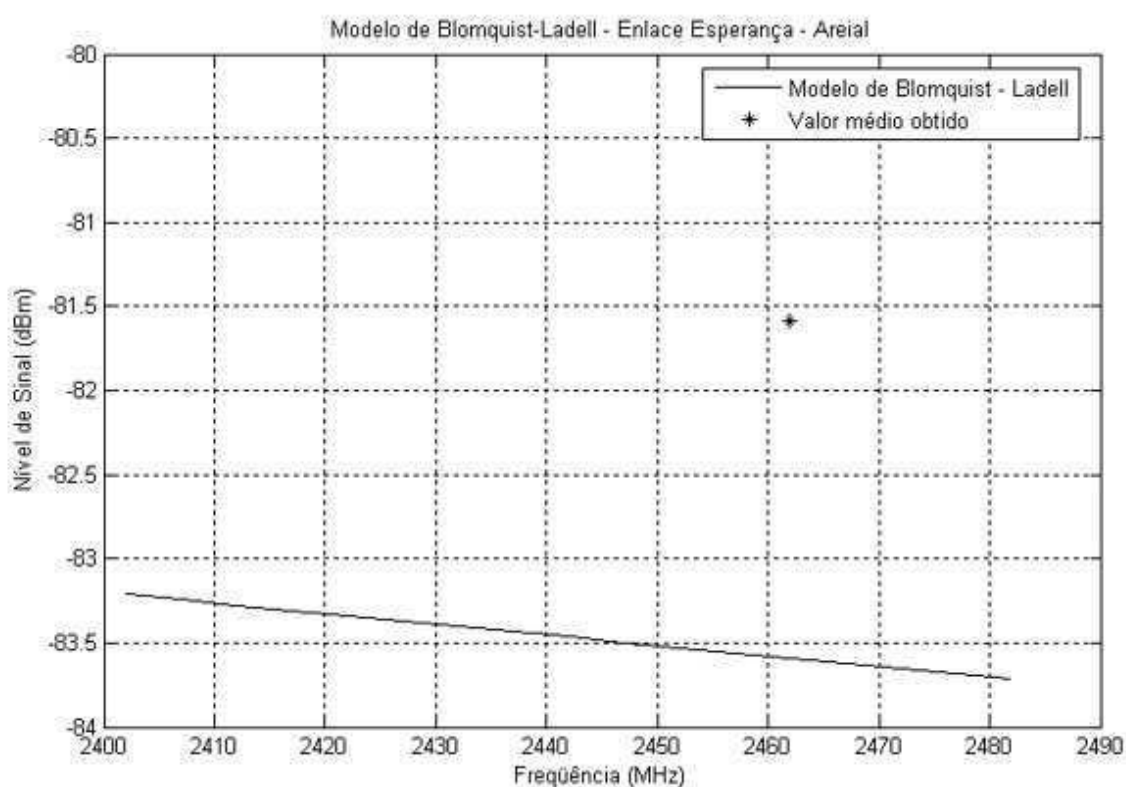


Figura 6.24: Resultados para o Modelo de Blomquist-Ladell no enlace Esperança - Areial

O erro cometido utilizando o Modelo de Blomquist-Ladell na situação deste enlace foi de -2,39% (-2.0028 dB).

Comparação com o Modelo de Lee

No modelo de Lee primeiramente calcula-se a condição padrão através do uso dos termos da Tabela 6.8, assim:

Assim,

Condição Padrão	Fatores de Correção
ERB	
Potência transmitida: $P_t^* = 17dBm = 50,11872mW = 50,11872 \cdot 10^{-3}W$	$\alpha_1 = 10 \cdot \log(50,11872 \cdot 10^{-3}/10) = -23$
Altura da antena: $h_1^* = 78,8 \text{ m}$	$\alpha_2 = 20 \cdot \log(78,8/30) = 8,388$
Ganho da antena: $g_t^* = 24 \text{ dB}$	$\alpha_3 = 24 - 6 = 18$
EM	
Altura da antena: $h_2^* = 9,7 \text{ m}$	$\alpha_4 = 20 \cdot \log(9,7/3) = 10,193$
Ganho da antena: $g_m^* = 24 \text{ dB}$	$\alpha_5 = 24$

Tabela 6.8: Condições padrão e fatores de correção (* parâmetros da nova condição)

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 + \alpha_5 = 37,581.$$

Na tabela, no cálculo da condição padrão de Lee já foram incluídos alguns parâmetros que compõem o valor de G_t . Assim, no cálculo final das perdas, o valor de G_t será igual a -4,796 dB. Esse valor corresponde às perdas de cabos e conectores e o ganho do dois cartões PCMCIA que não entraram na composição do valor padrão na tabela do cálculo de α . Considerou-se o terreno como plano e com nível de referência em 645 m, assim as alturas efetivas das antenas em Esperança e Areial serão 9,7 m e 78,8 m respectivamente.

A segunda etapa é a obtenção da previsão ponto-área. Se considerarmos a área do enlace como sendo área aberta, pela Figura 3.14, temos $P_0 = -61,7 \text{ dBm}$ e $\gamma = 38,4 \text{ dB/dec}$.

O valor da distância do enlace foi convertido de km para milhas, pois os parâmetros P_0 e γ são valores obtidos para $d_o = 1$ milha. Veja Figura 3.14, capítulo que descreve os modelos de propagação.

Na situação do enlace, aqui analisado, tem-se um percurso considerado obstruído. Isso porque no ponto crítico do enlace a 1ª zona de Fresnel não está totalmente livre nem com os 60% mínimos exigidos para um enlace ser considerado desobstruído. Logo a equação do modelo de Lee a ser utilizada é a (3.97), reescrita a seguir.

$$P = P_0 + \gamma \cdot \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + L + \alpha \quad (6.67)$$

Onde:

P = Potência recebida a uma distância r do transmissor em dB_m

P_0 = Potência recebida a uma distância d_0 do transmissor.

γ = Inclinação da perda de percurso em dB/séc;

d = Distância entre transmissor e receptor em km (milha);

$d_0 = 1$ km (1 milha);

h_e = Altura efetiva da antena base em metros;

h = Altura real da antena base em metros;

α = Fator de correção da condição padrão, tabela 6.8, em dB;

L = Perda por difração em dB.

O resultado obtido utilizando a equação 6.67 é:

$$P = -67.1064 \text{ dB}$$

Acrescentando-se o valor de G_t temos uma perda total no enlace de:

$$L_t = -71.9024 \text{ dBm}$$

Assim, o erro cometido utilizando o Modelo de Lee na predição das perdas do enlace foi de 13,47% (9,6866 dB).

A Tabela 6.9 contém o resumo dos resultados do enlace entre a ERB Esperança e a ERB Areial. Os modelos de Egli e de Blomquist-Ladell apresentaram erros menores que 10% e que estão dentro dos limites de erro e exatidão dos equipamentos utilizados. Com isso comprova-se a validade de ambos na situação avaliada. O modelo de Lee ficou um pouco acima de 13% e o modelo de dois raios apresentou um erro de quase 50%. Esse alto erro obtido se deve a obstrução por edificações no ponto crítico desse enlace. Nessa região ocorre obstrução de parte da primeira zona de Fresnel. Essa região concentra a maior parte da energia do radio enlace e possíveis obstruções acarretam perdas consideráveis no modelo de dois raios.

	Valor medido (dbm)	Valor teórico (dbm)	Erro (dB)	Erro (%)
Modelo de dois Raios	-81,5890	-54,5079	27,0811	49,68
Modelo de Egli	-81,5890	-74,2824	7,29664	9,83
Modelo de Blomquist - Ladell	-81,5890	-83,5918	-2,0028	- 2,39
Modelo de Lee	-81,5890	-71,9024	9,6866	13,47

Tabela 6.9: Resultados obtidos no enlace ERB Esperança - ERB Areial

Coodenadas	S 07,018510416° W 35,84716834°
Ângulos θ (rad) (Graus) ϕ (rad) (Graus)	1,69329244214 97,018510416° 5,65753419212 -35,84716834°
Altura registrada pelo GPS	642 m
Precisão do GPS no instante da medição	7,6 m
Altura da antena acima do GPS	25 m
Comprimento aproximado do cabo - Antena / AP	35 m
Conectores N - Macho	1
Conectores N - Fêmea	1
Raio total	6.378.667,0 m
X_{ERB}	5.131.689,08083 m
Y_{ERB}	-3.707.516,82648 m
Z_{ERB}	-779.409,299342 m

Tabela 6.10: Dados obtidos na repetidora Esperança

Coordenadas	S 06,965766667° W 35,70258333°
Ângulos θ (rad) (Graus) ϕ (rad) (Graus)	1,69237189006 96,965766667° 5,66005767659 -35,70258333°
Altura registrada pelo GPS	630,5 m
Precisão do GPS no instante da medição	12,5 m
Altura da antena acima do GPS	7 m
Comprimento aproximado do cabo - Antena / AP	10 m
Conectores N - Macho	1
Conectores N - Fêmea	1
SNR	47,6200 dB
Nível de Sinal	- 49,5000 dBm
Nível de Ruído	- 97,1200 dBm
Raio total	6.378.637,50 m
X_{ERB}	5.141.585,275946 m
Y_{ERB}	-3.694.955,353319 m
Z_{ERB}	-773.577,496811 m
Distância	17021,6099 m

Tabela 6.11: Dados obtidos na repetidora Areia

Transmissor	Ganho / Perda
Ganho da antena em grade (ERB ESP)	24 dB
Ganho do amplificador (Tx)	30 dBm
Perdas nos conectores da ERB (2 unid.)	- 1 dB
Perda no pigtail da ERB (1 unid.)	- 0,5 dB
Perdas no cabo da ERB (35m x -0,252dB)	- 8,82 dB
Potência Transmitida	15 dBm (+/- 2 dB)
Receptor	Ganho / Perda
Ganho da Antena em grade (cliente)	24 dB
Ganho do amplificador (Rx)	17 dB
Perdas nos conectores do equipamento de medição (4 unid.)	- 2 dB
Perda no pigtail (1 unid.)	- 0,5 dB
Perdas no cabo (aprox. 15m x -0,252dB)	- 3,78 dB
Ganho do Cartão PCMCIA usado na medição	2,5 dB
Total (G_t)	97,9 dB

Tabela 6.12: Composição do valor de G_t para o enlace repetidora Esperança - repetidora Areia

6.2.2 Enlace Repetidora Esperança - Repetidora Areia

Comparação com o Modelo de Dois Raios e a Primeira Zona de Fresnel

Seguindo o mesmo procedimento do enlace anterior, começamos calculando a corda da curvatura da terra.

$$h_t = \frac{d_1 d_2}{12,74K} \quad (6.68)$$

Onde:

$$d_1 = 2,8216 \text{ km}$$

$$d_2 = 14,2 \text{ km}$$

$$K = 4/3$$

$$h_t = \frac{2,8216 \cdot 14,2}{12,74 \cdot \frac{4}{3}} = 2,3587 \text{ m} \quad (6.69)$$

Como no caso anterior considera-se o terreno no enlace como sendo plano, por causa do baixo valor de h_t . Em seguida são calculados as alturas das antenas efetivas h_1 e h_2 . Para isso considera-se o terreno como plano e com nível de referência em 630 m, as alturas efetivas das antenas em Esperança e Areia serão 37 m e 7,5 m respectivamente.

Assim, utilizando a equação:

$$L_p = -20 \cdot \log(h_1) - 20 \cdot \log(h_2) + 40 \cdot \log(d) \quad (6.70)$$

Teremos uma perda no enlace de:

$$L_p = 120,3748 \text{ (dB)} \quad (6.71)$$

Usando a equação para o cálculo do raio da 1ª zona de Fresnel

$$R = 17,3 \cdot \sqrt{\frac{d_1 d_2}{fd}} \quad (6.72)$$

Onde:

$$d = 17,02161 \text{ km}$$

$$d_1 = 14,2 \text{ km}$$

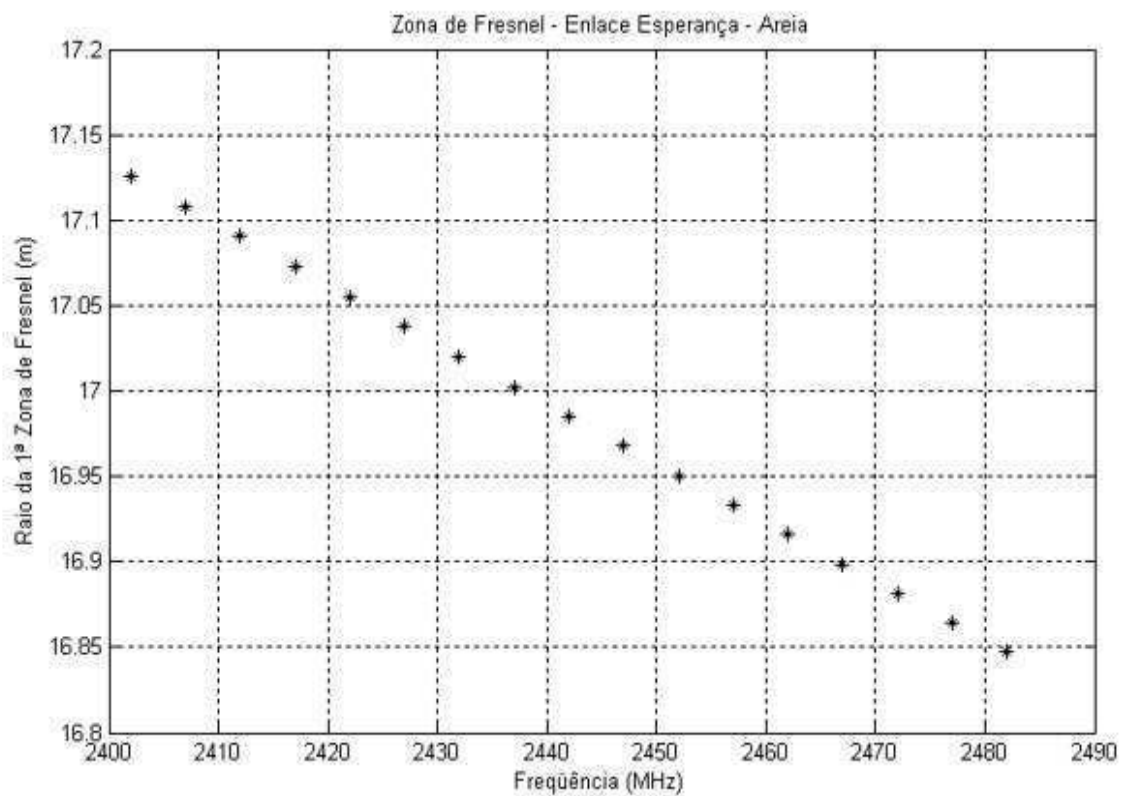


Figura 6.25: Raio da 1ª Zona de Fresnel em função da frequência para o ponto crítico do enlace Esperança - Areia

$$d_2 = 2,8216 \text{ km}$$

Observando o enlace desenhado no Anexo F.2, teremos um valor aproximado para H (Figura G.1) de 5,6 metros. É importante lembrar novamente que no enlace entre a repetidora Esperança e a repetidora de Areia não foi possível obter dados reais da topografia do terreno. Os pontos extremos são dados medidos com o GPS. O desenho do terreno foi feito com base no aspecto visual da topografia vista nos dois pontos do enlace. Assim todos os dados obtidos aqui servem apenas para uma análise qualitativa.

Sabendo que no enlace analisado o canal utilizado foi o 1 ($f = 2,412 \text{ GHz}$ e $R = 17,09 \text{ m}$). Logo, a relação H/R será igual a 0.327 metros. Assim como $H/R < 0.6$ tem-se uma obstrução. Pela figura do enlace, Anexo F.2, temos uma obstrução tipo bordas arredondadas, cuja espessura é maior que $\lambda/10$ (0,0124378 m). Esse ponto, visualmente, é fácil de ser localizado em cima da repetidora de Areia. Infelizmente por ser um ponto de difícil acesso não foi possível coletar os dados de posição deste ponto crítico.

Para o cálculo das perdas utiliza-se a equação (3.89) repetida abaixo:

$$\alpha = \frac{\lambda^{\frac{2}{3}} r^{\frac{1}{3}}}{R} \quad (6.73)$$

Onde:

λ é o comprimento de onda e tem valor 0,124378 m

$R = 17,09 \text{ m}$

r é calculado utilizando as equações (3.90) e (3.91) utilizando os valores abaixo.

$$X_1 = 200 \text{ m} \quad X_2 = -200 \text{ m} \quad X_3 = 400 \text{ m} \quad X_4 = -400 \text{ m}$$

$$Y_1 = 0,5 \text{ m} \quad Y_2 = 0,5 \text{ m} \quad Y_3 = 1 \text{ m} \quad Y_4 = 1 \text{ m}$$

Logo, das equações (3.90) e (3.91) temos que $r = 60000 \text{ m}$.

Assim, $\alpha = 0,57078$.

Utilizando as curvas do Anexo G, temos que a perda, aproximada, da obstrução é -17,5 dB.

Ou seja, a perda total prevista para o enlace é:

$$L_t = -17,5 + 97,9 - 120,3748 = -39,9748 \text{ dB}$$

A perda média medida neste enlace, e apresentada na Tabela 6.11, foi de - 49,5 dBm. O erro entre a predição e o valor medido foi de 23,82% (9,52 dB).

Comparação com o Modelo de Egli

Repetindo o procedimento do caso anterior temos:

$$\beta = \left(\frac{40}{f}\right)^2 \quad (6.74)$$

Em seguida, utilizamos novamente a equação (3.92) sem os parâmetros G_b e G_m . Na Figura (6.26), observa-se o resultado obtido com o modelo de Egli.

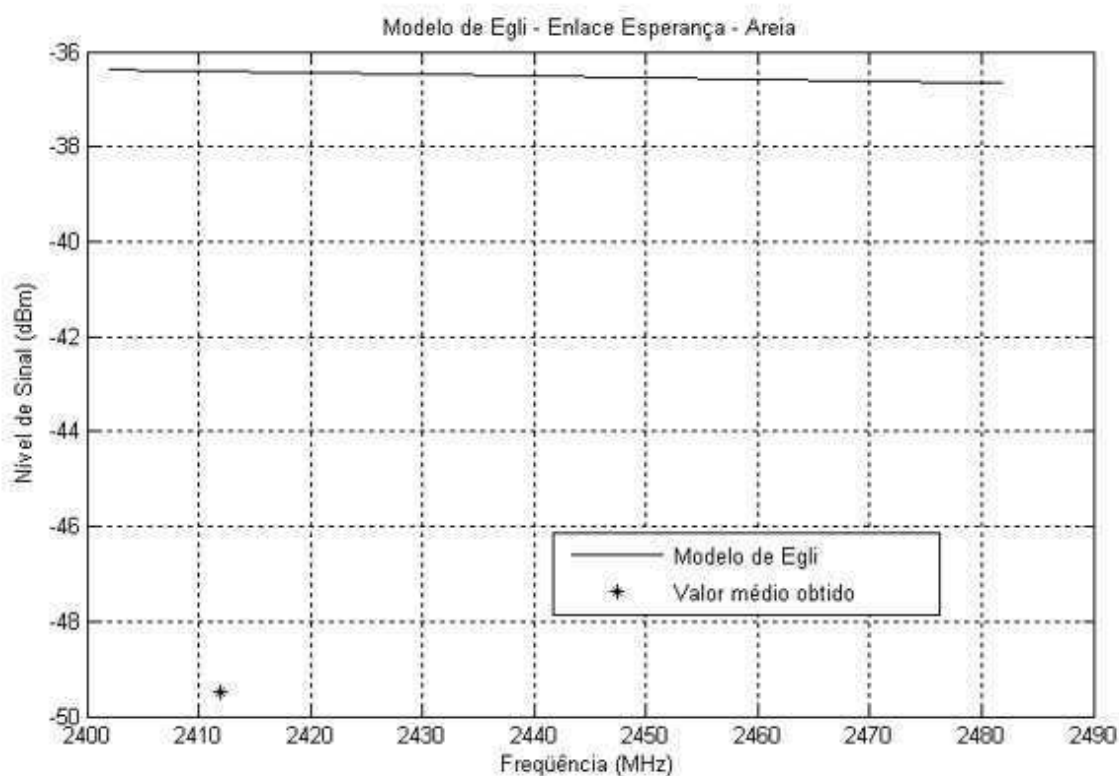


Figura 6.26: Resultados obtidos no enlace Esperança - Areia para o Modelo de Egli

O erro encontrado utilizando o Modelo de Egli foi de 35,92% (13,0818 dB).

Comparação com o Modelo de Blomquist-Ladell

Para o modelo de Blomquist-Ladell as equações e considerações são repetidas também neste enlace.

O termo L_D terá valor igual à -17,5 dB como calculado no modelo de dois raios para o ponto crítico. E o termo L'_p pode ser obtido utilizando a equação de terra plana (3.87) tendo em vista que a influência da curvatura da terra e da troposfera, aqui, também não serão consideradas.

O resultado obtido é apresentado na figura a seguir.

Aqui, o erro encontrado quando utiliza-se o Modelo de Blomquist-Ladell foi de 10,52% (4,7136 dB).

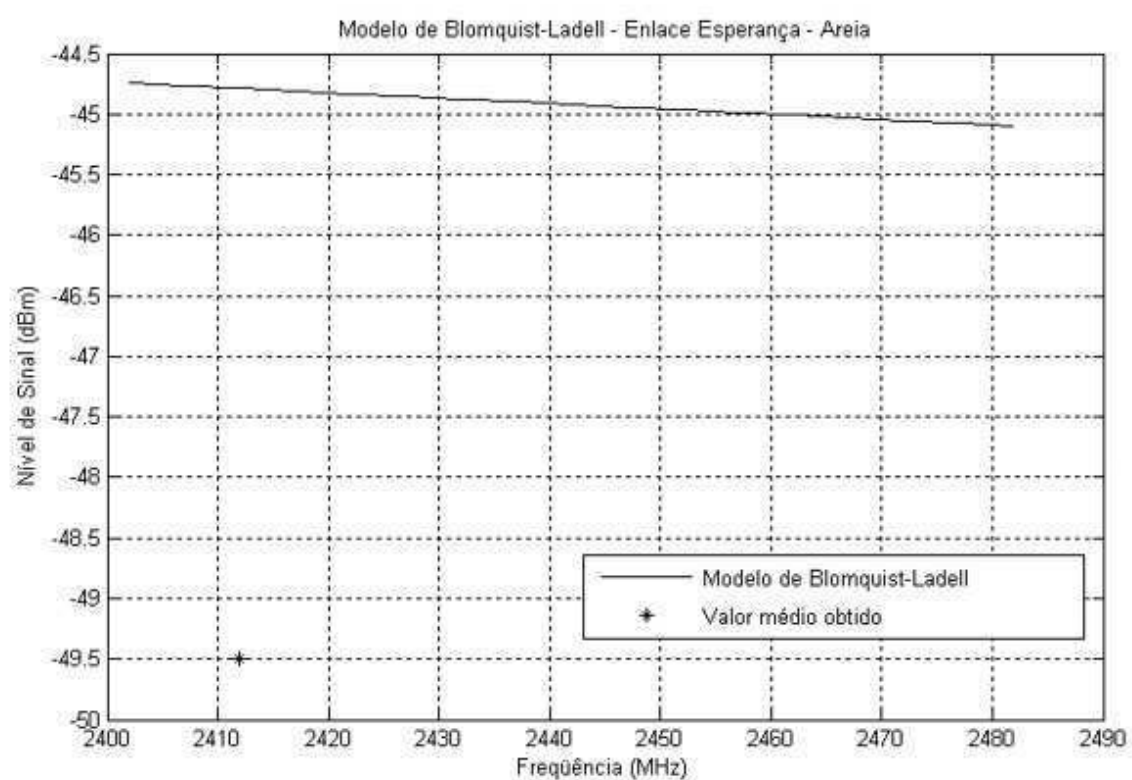


Figura 6.27: Resultados obtidos no enlace Esperança - Areia para o Modelo de Blomquist-Ladell

Comparação com o Modelo de Lee

O procedimento para o modelo de Lee será o mesmo. Primeiro calcula-se a condição padrão através do uso dos termos da Tabela 6.13:

Condição Padrão	Fatores de Correção
ERB	
Potência transmitida: $P_t^* = 1W$	$\alpha_1 = 10. \log(1/10) = -10$
Altura da antena: $h_1^* = 37 \text{ m}$	$\alpha_2 = 20. \log(37/30) = 1,8216$
Ganho da antena: $g_t^* = 24 \text{ dB}$	$\alpha_3 = 24 - 6 = 18$
EM	
Altura da antena: $h_2^* = 7,5 \text{ m}$	$\alpha_4 = 20. \log(7,5/3) = 7,9588$
Ganho da antena: $g_m^* = 24 \text{ dB}$	$\alpha_5 = 24$

Tabela 6.13: Condições padrão e fatores de correção (* parâmetros da nova condição)

Assim,

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 + \alpha_5 = 41,7804$$

Na tabela 6.13, o cálculo da condição padrão de Lee já foi incluído alguns parâmetros que compõem o valor de G_t . Como no caso anterior o valor de G_t será menor e aqui é igual a 2,9 dB. Considerou-se também o terreno como plano e com nível de referência em 630 m; assim alturas efetivas das antenas em Esperança e Areia serão 37 m e 7,5 m. A segunda etapa é a obtenção da previsão ponto-área. Se considerarmos a área do enlace como sendo área aberta, pela Figura 3.14, temos $P_0 = -61,7 \text{ dBm}$ e $\gamma = 38,4 \text{ dB/dec}$.

O valor da distância do enlace foi convertido de km para milhas, pois os parâmetros P_0 e $\gamma = 38,4$ são valores obtidos para $d_o = 1$ milha. Veja Figura 3.14.

Na situação do enlace, aqui analisado, tem-se um percurso considerado obstruído. Isso porque no ponto crítico do enlace a 1ª zona de Fresnel não está totalmente livre nem com os 60% mínimos exigidos para um enlace ser considerado desobstruído. Logo a equação do modelo de Lee a ser utilizada é a (3.97), reescrita a seguir.

$$P = P_0 + \gamma \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + L + \alpha \quad (6.75)$$

O resultado obtido utilizando a equação acima é:

$$P = -76,7546 \text{ dB.}$$

Acrescentando-se o valor de G_t temos uma perda total no enlace de:

$$L_t = -73,8546 \text{ dB}$$

O erro cometido utilizando o Modelo de Lee foi de 32,97 % (-24,3546 dB).

Como a topográfica do terreno utilizada nestes cálculos não é um valor exato pode-se verificar outra situação. Se fosse considerado o percurso sem obstrução a equação utilizada seria a (3.96) e os resultados:

$$P = -55,8494 \text{ dB}$$

Em seguida soma-se o valor de G_t :

$$L_t = -52,9494 \text{ dB}$$

Logo, o erro cometido utilizando o Modelo de Lee para esta outra situação seria de 6,51% (3,4494 dB).

Na Tabela 6.14 encontram-se os valores para o enlace entre a repetidora de Esperança e a repetidora de Areia. O modelo de Blomquist-Ladell apresenta erro bem próximo dos 10% e que é um limite tolerável para a situação analisada aqui. Os demais modelos apresentaram taxas de erros bem elevadas. No modelo do Lee além foram consideradas duas situações: Com obstrução e sem obstrução. Esses dois casos foram considerados porque não houve a possibilidade de se obter dados mais precisos sobre a região compreendida no enlace em questão. Sendo assim, considerou-se como possível as duas situações. Supondo o enlace com obstrução o erro obtido ficou perto dos 33%. No entanto, no caso de não obstrução, mas próximo da realidade, pois ambas as antenas estão em linha de visada direta, obteve-se um erro abaixo do 7% comprovando e a possibilidade de não obstrução como mais próxima dos valores medidos

	Valor medido (dbm)	Valor teórico (dbm)	Erro (dB)	Erro (%)
Modelo de dois Raios	-49,50	-39,9748	9,5252	23,82
Modelo de Egli	-49,50	-36,4182	13,0818	35,92
Modelo de Blomquist - Ladell	-49,50	-44,7864	4,7136	10,52
Modelo de Lee	-49,50	-73,8546	-24,3546	32,97
		-52,9494	3,4494	6,51

Tabela 6.14: Resultados obtidos no enlace repetidora Esperança - repetidora Areia

Coordenadas	S 07,210816667° W 35,87603333°
Ângulos θ (rad) (Graus) ϕ (rad) (Graus)	1,69664881939 97,210816667° 5,657030403 -35,87603333°
Altura registrada pelo GPS	555,2 m
Precisão do GPS no instante da medição	6,9 m
Altura da antena acima do GPS	5 m
Comprimento aproximado do cabo - Antena / AP	7 m
Conectores N - Macho	1
Conectores N - Fêmea	1
Raio total	6.378.560,2 m
X_{ERB}	5.127.586,174833 m
Y_{ERB}	-3.708.485,598246 m
Z_{ERB}	-800.640,2515 m

Tabela 6.15: Dados obtidos na ERB em Campina Grande

Coodenadas	S 07,162059138° W 35,85285799°
Ângulos θ (rad) (Graus) ϕ (rad) (Graus)	1,69579783997 97,162059138° 5,65743488899 -35,85285799°
Altura registrada pelo GPS	687,5 m
Precisão do GPS no instante da medição	11,3 m
Altura da antena acima do GPS	0,15 m
Comprimento aproximado do cabo - Antena / AP	3 m
Conectores N - Macho	1
Conectores N - Fêmea	1
SNR	16,44922 dB
Nível de Sinal	- 66,60938 dBm
Nível de Ruído	- 83,05859 dBm
Raio total	6.378.687,65 m
X_{ERB}	5.129.738,656712 m
Y_{ERB}	-3.706.883,03972 m
Z_{ERB}	-795.270,7589 m
Distância	6002,7346 m

Tabela 6.16: Dados obtidos na ERB (Areal)

Coordenadas Geográficas	Altura	Precisão (GPS)	Distância para ERB
S 07,02747° W 35,87531°	561,4 m	7,8 m	380,7 m
S 07,20233° W 35,87373°	570,1 m	7,4 m	978,2 m
S 07,19395° W 35,86505°	573,8 m	7,5 m	2240 m
S 07,18514° W 35,86235°	573,8 m	7,0 m	3230 m
S 07,16948° W 35,85515°	642,5 m	6,9 m	5150 m
S 07,16489° W 35,85235°	650,7 m	6,9 m	5740 m

Tabela 6.17: Dados topográficos obtidos no enlace ERB Campina Grande - repetidora Lagoa Seca

6.2.3 Enlace ERB Campina Grande - Repetidora Lagoa Seca

O procedimento para conversão dos dados de coordenadas geográficas para esféricas são os mesmos já mencionados na primeira parte. Os valores de d , x , y e z presentes nas tabelas 6.15 e 6.16 são obtidos utilizando as equações de (6.1) a (6.6).

Comparação com o Modelo de Dois Raios e a Primeira Zona de Fresnel

Realizando novamente o mesmo procedimento dos dois enlaces anteriores, temos:

Para a curvatura da terra,

$$d_1 = 0,3807 \text{ km}$$

$$d_2 = 5,622 \text{ km}$$

$$K = 4/3$$

$$h_t = \frac{0,3807 \cdot 5,622}{12,74 \cdot \frac{4}{3}} = 0,126 \text{ m} \quad (6.76)$$

O valor obtido para h_t (flexa curvatura da terra) é muito pequeno, possibilitando a consideração da terra plana na região do enlace. Em seguida é feita a segunda consideração referente às alturas das antenas h_1 e h_2 . Considerando o terreno como plano e com nível de referência

Transmissor	Ganho / Perda
Ganho da Antena Omnidirecional (ERB)	15 dB
Ganho do amplificador (Tx)	30 dB
Perdas nos conectores da ERB (2 unid.)	- 1 dB
Perda no pigtail da ERB (1 unid.)	- 0,5 dB
Perdas no cabo da ERB (7m x -0,252dB)	- 1,764 dB
Potência Transmitida	15 dBm (+/- 2 dB)
Receptor	Ganho / Perda
Ganho da Antena em painel (cliente)	12 dB
Ganho do amplificador (Rx)	17 dB
Perdas nos conectores do equipamento de medição (4 unid.)	- 2 dB
Perda no pigtail (1 unid.)	- 0,5 dB
Perdas no cabo (aprox. 8m x -0,252dB)	- 2,016 dB
Ganho do Cartão PCMCIA usado na medição	2,5 dB
Total (G_t)	85,72 dB

Tabela 6.18: Composição do valor de G_t para o enlace Campina Grande - Lagoa Seca

em 550 m, as alturas efetivas das antenas em Campina Grande e Lagoa Seca serão 10,2 m e 137,65 m respectivamente.

Assim, utilizando a equação:

$$L_p = -20 \cdot \log(h_1) - 20 \cdot \log(h_2) + 40 \cdot \log(d) \quad (6.77)$$

Teremos uma perda no enlace de:

$$L_p = 88,1863 \text{ (dB)} \quad (6.78)$$

Usando a equação para o cálculo do raio da 1ª zona de Fresnel.

$$R = 17,3 \cdot \sqrt{\frac{d_1 d_2}{f d}} \quad (6.79)$$

Onde:

$$d = 6,0027 \text{ km}$$

$$d_1 = 5,622 \text{ km}$$

$$d_2 = 6,0027 - 5,622 = 0,3807 \text{ km}$$

Observando o enlace desenhado no Anexo F.3, teremos um valor aproximado para H (Figura G.1) de 5 metros. Sabendo que no enlace analisado o canal utilizado foi o 2 temos $f = 2,417$ GHz e $R = 6,6446$ m. Logo, a relação H/R será igual a 0.7524 metros. Assim com $H/R > 0.6$ não ocorre obstrução.

Assim a perda total teórica prevista para o enlace é:

$$L_t = -88,1863 + 85,72 = -2,4663 \text{ dB}$$

A perda média neste enlace, e apresentada na Tabela 6.16, foi de - 66,609 dBm. O erro entre a predição e o valor medido foi de 2600 % (64,1427 dB).

No entanto, o ponto em questão teve sua medição realizada ao nível do solo e este ponto possui edificações. Assim se as considerarmos com uma altura média de 5 metros e que elas contribuem negativamente com o valor de H, teríamos um novo valor para H (0 m). Pela figura do enlace, Anexo G, temos uma obstrução tipo bordas arredondadas, cuja espessura é maior que $\lambda/10$ (0,01218 m).

Para o cálculo das perdas utiliza-se a equação (3.89) repetida abaixo:

$$\alpha = \frac{\lambda^{\frac{2}{3}} r^{\frac{1}{3}}}{R} \quad (6.80)$$

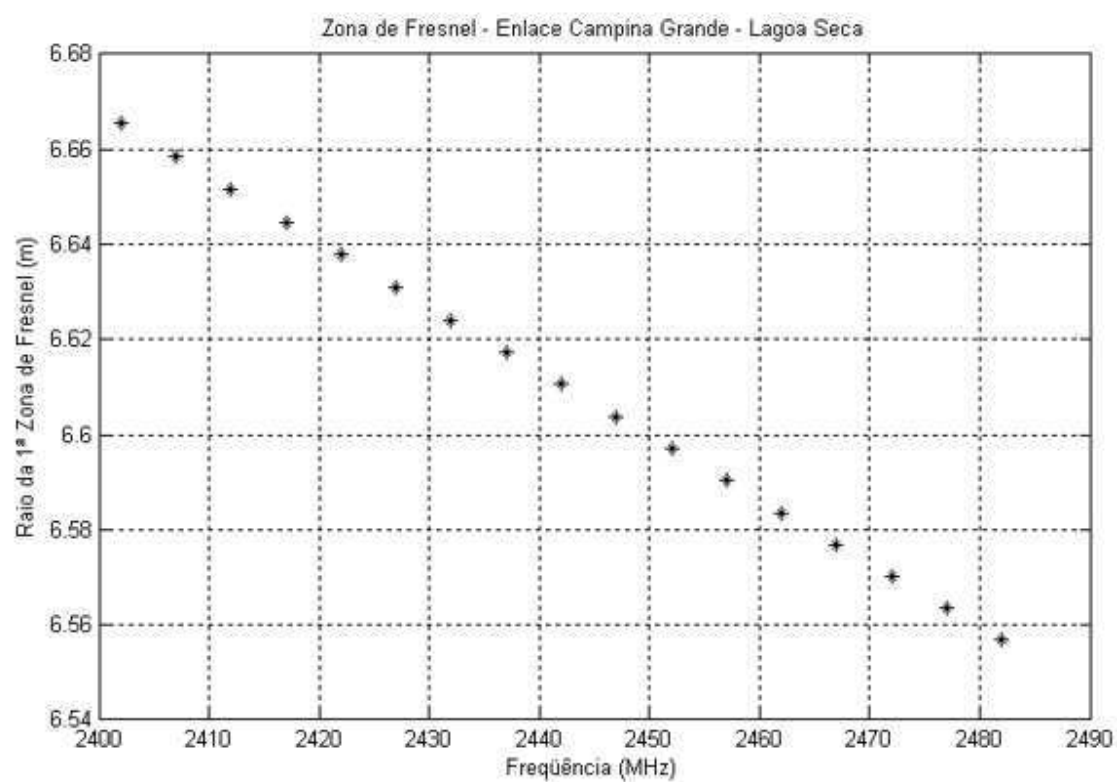


Figura 6.28: Raio da 1ª Zona de Fresnel em função da frequência para o ponto crítico do enlace Campina Grande - Lagoa Seca

Onde:

λ é o comprimento de onda e tem valor 0,1218 m

$$R = 12,64 \text{ m}$$

r é calculado utilizando as equações (3.90) e (3.91) como ilustrado na Figura 10 do capítulo anterior.

$$X_1 = -50 \text{ m} \quad X_2 = 150 \text{ m} \quad X_3 = -150 \text{ m} \quad X_4 = -350 \text{ m}$$

$$Y_1 = 1,8 \text{ m} \quad Y_2 = 1,8 \text{ m} \quad Y_3 = 4,8 \text{ m} \quad Y_4 = 4,8 \text{ m}$$

Logo, das equações (3.90) e (3.91) temos que $r = 5512,15 \text{ m}$.

Assim, $\alpha = 0,343$.

Utilizando as curvas do Anexo G, temos que a perda, aproximada, da obstrução é -8 dB.

Assim a perda total prevista para o enlace é:

$$L_t = -8 + 60,204 - 98,7119 = -46,5079 \text{ dB}$$

A perda média nesse enlace, e apresentada na Tabela 6.16, foi de - 66,609 dBm. O erro entre a predição e o valor medido foi de 43,22 % (20,1011 dB). Este resultado é bem melhor que na consideração anterior.

Comparação com o Modelo de Egli

Realizando o mesmo procedimento dos dois casos anteriores temos:

O erro cometido na predição das perdas do enlace utilizando o Modelo de Egli foi de 74,87% (28,5187 dB).

Comparação com o Modelo de Blomquist-Ladell

Repetindo as equações e considerações feitas nos dois enlaces anteriores, chega-se a:

O erro cometido utilizando o Modelo de Blomquist-Ladell foi de 16,12% (9,2504 dB) com $LD = 0$.

O erro cometido utilizando o Modelo de Blomquist-Ladell foi de 13,86% (8,1083 dB) com $LD = -8$.

Comparação com o Modelo de Lee

O procedimento para o modelo de Lee será igual aos dois enlaces anteriores. Primeiro calcula-se a condição padrão através do uso dos termos da Tabela 6.19:

Assim,

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 + \alpha_5 = 34,862.$$

Como nos dois casos anteriores, o valor de G_t terá seu valor modificado devido a alguns dos fatores de composição do termo já estarem incluídos no próprio modelo. Logo $G_t = 11,72 \text{ dB}$.

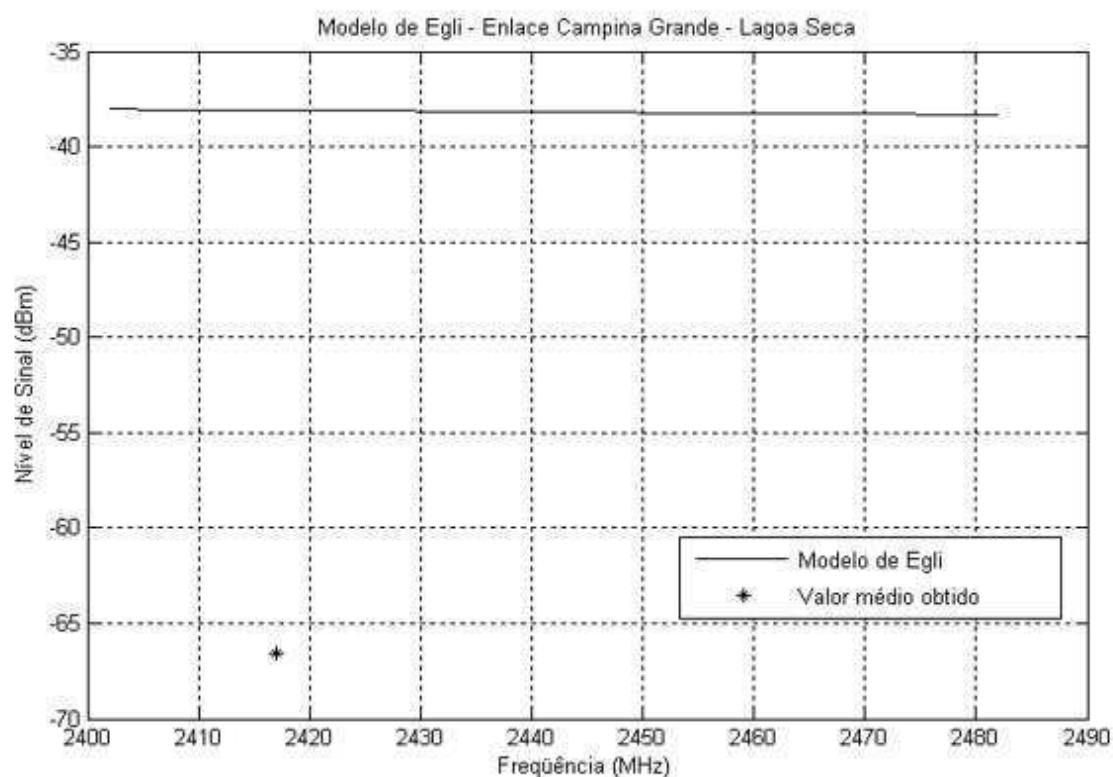


Figura 6.29: Resultados obtidos para o modelo de Egli no enlace Campina Grande - Lagoa Seca

Condição Padrão	Fatores de Correção
ERB	
Potência transmitida: $P_t^* = 1W$	$\alpha_1 = 10 \cdot \log(1/10) = -10$
Altura da antena: $h_1^* = 137,65 \text{ m}$	$\alpha_2 = 20 \cdot \log(137,5/30) = 13,223$
Ganho da antena: $g_t^* = 12 \text{ dB}$	$\alpha_3 = 12 - 6 = 6$
EM	
Altura da antena: $h_2^* = 10,2 \text{ m}$	$\alpha_4 = 20 \cdot \log(10,2/3) = 10,63$
Ganho da antena: $g_m^* = 15 \text{ dB}$	$\alpha_5 = 15$

Tabela 6.19: Condições padrão e fatores de correção (* parâmetros da nova condição)

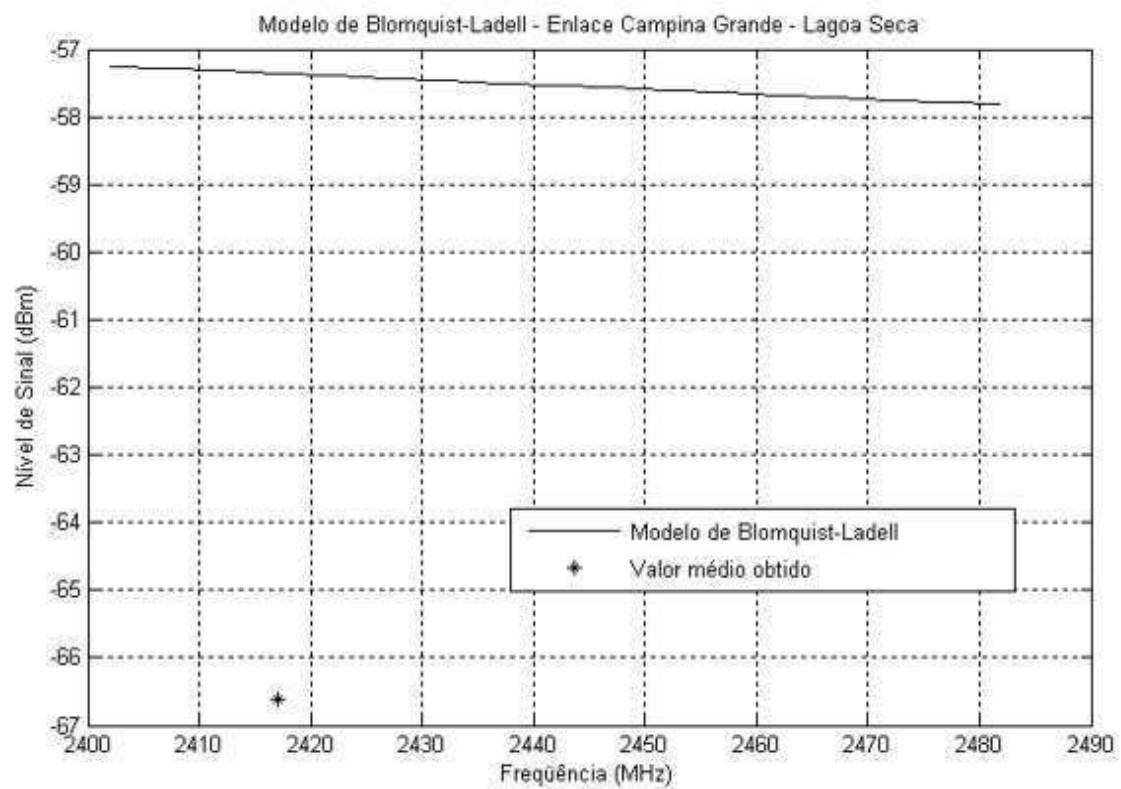


Figura 6.30: Resultados obtidos para o modelo de Blomquist-Ladell no enlace Campina Grande - Lagoa Seca sem perdas por difração

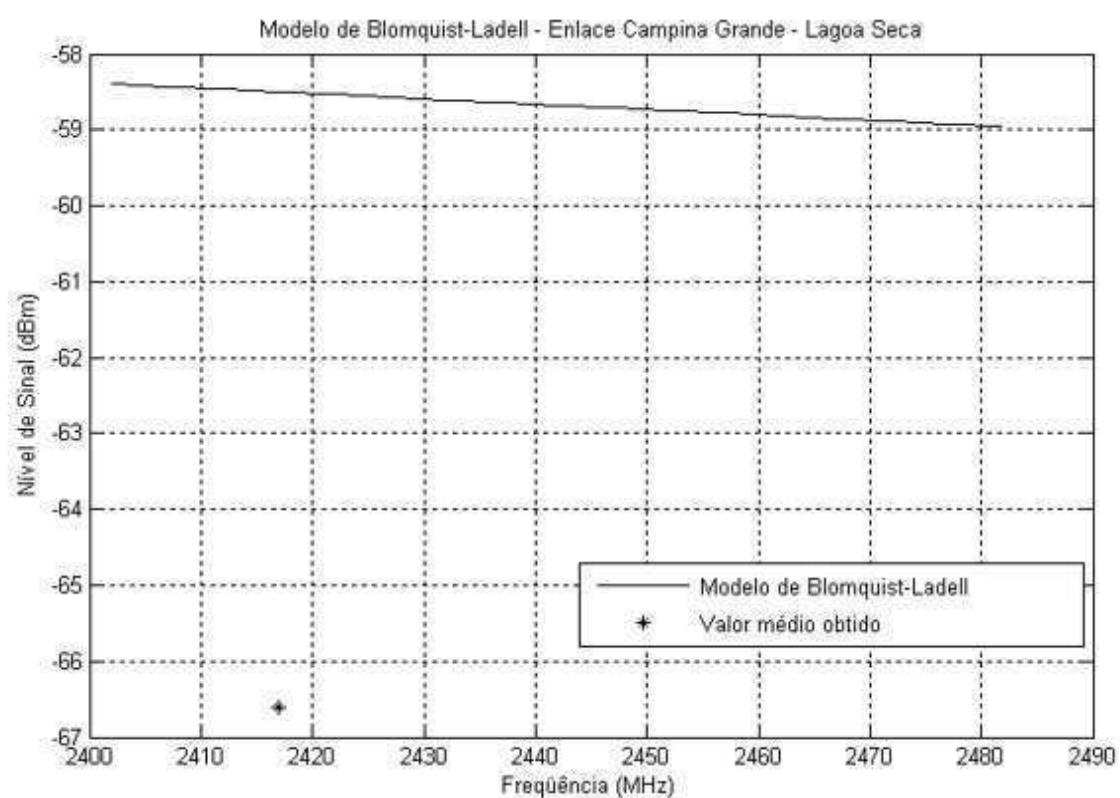


Figura 6.31: Resultados obtidos para o modelo de Blomquist-Ladell no enlace Campina Grande - Lagoa Seca com perdas por difração

Foi considerado também o terreno como plano e com nível de referência em 550 m e assim as alturas efetivas das antenas em Campina Grande e Lagoa Seca serão 10,2 m e 137,65 m.

Na segunda etapa, é obtida a previsão ponto-área. Considerando a área do enlace como sendo área aberta, pela Figura 3.14, temos $P_0 = -61,7$ dBm e $\gamma = 38,4$ dB/dec.

Onde o valor da distância do enlace foi convertido de km para milhas, pois os parâmetros P_0 e γ são valores obtidos para $d_0 = 1$ milha. Veja Figura 3.14.

Na situação do enlace, aqui analisado, tem-se um percurso considerado obstruído. Isso porque no ponto crítico do enlace a 1ª zona de Fresnel não está totalmente livre nem com os 60% mínimos exigidos para um enlace ser considerado desobstruído. Logo a equação do modelo de Lee a ser utilizada é a 3.97, reescrita a seguir.

$$P = P_0 + \gamma \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + L + \alpha \quad (6.81)$$

O resultado obtido utilizando a equação acima é:

$$P = -64,7916 \text{ dBm.}$$

Acrescentando-se o valor de G_t temos uma perda total no enlace de:

$$L_t = -53,0716 \text{ dB}$$

O erro cometido foi de 25,50% (13,5374 dB) em relação ao valor medido.

O terceiro e último enlace avaliado teve seus resultados condensados na Tabela 6.20. Esse enlace, interligando as cidades de Campina Grande e Lagoa Seca foi o que apresentou maior discrepância entre os valores medidos e os valores teóricos. No entanto, o modelo de Blomquist-Ladell mostrou-se ainda bem eficiente. Com erro de aproximadamente 16% considerando a perda por difração no ponto crítico do enlace como sendo igual a zero e de 13,86 % quando a perda por difração foi considerada igual a -8 dB. As perdas por difração foram calculadas utilizando o método descrito em (TELEBRAS, 1982) e foi utilizada também no modelo de dois raios no mesmo enlace. O enlace Campina Grande - Lagoa possui particularidades que influenciaram nos resultados como: a distância (a menor dos três casos avaliados), área urbana mais densa e com edificações com maior altura média, influência no ponto crítico não foi considerada, tipos de antenas utilizadas no enlace (omnidirecional e painel ao invés de antenas direcionais como nos dois casos anteriores) e por fim a quantidade de ruído proveniente de outras fontes. A substituição da antena tipo painel por uma em grade aumentou o nível de sinal medido em cerca de 10 dB. Isso ocasiona uma diminuição dos erros obtidos para todos modelos.

	Valor medido (dbm)	Valor teórico (dbm)	Erro (dB)	Erro (%)
Modelo de dois Raios	-66,609	-2,4663	64,1427	2600
		-46,5079	20,1011	43,22
Modelo de Egli	-66,609	-38,0903	28,5187	74,87
Modelo de Blomquist - Ladell	-66,609	-57,3586	9,2504	16,12
		-58,5007	8,1083	13,86
Modelo de Lee	-66,609	-53,0716	13,5374	25,50

Tabela 6.20: Resultados obtidos no enlace ERB Campina Grande - repetidora Lagoa Seca

Capítulo 7

Conclusões

Neste trabalho foram realizadas, comparações da aplicação de alguns modelos de predição das perdas de propagação em uma rede de computadores sem fio funcionando um ambiente urbano. Para isso foram escolhidos os modelos de maior destaque na bibliografia pesquisada. É importante ressaltar que os modelos foram originalmente criados para a análise na telefonia móvel celular. Por isso, a situação específica estudada aqui, está fora das hipóteses de validade de muitos dos modelos utilizados nas comparações. Sendo assim, a falta de um modelo específico na descrição das perdas de propagação de uma rede de computadores sem fio motivou a realização deste trabalho. A partir dessa constatação, inicialmente desprezaram-se as hipóteses de validade dos modelos e verificou-se que:

- A localização da antena cliente, no topo das edificações e não no nível do solo como na telefonia celular, tem bastante influência nos resultados da aplicação de vários modelos. Isso ocorre porque as equações apresentam uma componente de perda de propagação que leva em consideração a atenuação do nível do sinal entre o topo da edificação e o nível do solo (local do receptor móvel). Esse fato não ocorre na situação deste trabalho. Assim, esse termo, quando presente no modelo, foi igualado a zero por não ter significado na situação analisada.
- A tabela 2.2 apresenta as faixas de operações de diversos sistemas celulares (na faixa de 800 e 900 MHz). A concepção da maioria dos modelos são para essas faixas de frequências e a utilização de valores entre 2400 e 2483 MHz, ocasiona alterações nos resultados. Isso porque os modelos possuem uma forte dependência da frequência de operação.
- A altura da antena cliente acima das edificações, com linha de visada, é outro fator relevante.

- Verificou-se que o método, nas medições utilizado apresentou valores coerentes e com uma boa exatidão para os objetivos do trabalho, este fato foi verificado no capítulo dos ajustes para medidas. Resultados com uma maior exatidão poderiam ser obtidos utilizando um analisador de espectro, do mesmo utilizado no laboratório, nas medições externas.
- Os dados de posição foram coletados utilizando um GPS. No entanto, a exatidão deste equipamento que variava entre 6,4 m e 13,5 m. Esses valores dependiam do local, do nível e do número de satélites captados pelo equipamento sendo um dos motivos pelos quais se tem flutuação dos pontos sobre os modelos teóricos. Para se obter valores exatos de distância entre pontos, ERB-Cliente, na região urbana, foi utilizado o método apresentado, 6.1 a 6.7, no capítulo análise de medidas.

Os níveis de potência obtidos com aplicação do modelo de Okumura-Hata foram bem maiores que os valores medidos. A frequência utilizada, distância ERB-Cliente e altura da estação base foram os principais fatores que influenciaram nos resultados por estarem fora da faixa de validade. Esses fatores foram reforçados com os resultados dos modelos do CCIR e de Hata estendido. Os dois modelos têm como base o modelo de Okumura-Hata. O primeiro adiciona um fator de correção dependente do grau de urbanização do terreno. Quando considerou-se esse termo, B1, com valor de 20 %, os resultados foram bem melhores que os do modelo original, apesar de ainda estarem distante dos dados obtidos. Esses resultados foram semelhantes aos obtidos com o modelo de Hata estendido. A vantagem desse último é a não necessidade de considerar o fator B1.

À primeira vista, o modelo de Hata modificado deveria apresentar melhores resultados que os anteriores por sua faixa de frequência mais ampla, até 3000 MHz. No entanto, este fato não se confirmou. A faixa de validade para altura da ERB e a distância entre transmissor e receptor ainda estavam fora da situação estudada.

Para o modelo COST 231, tanto em LOS e NLOS ficaram acima dos valores medidos. A situação em NLOS apresentou resultados melhores que o LOS. Porém, as equações do NLOS dependem de parâmetros de difícil obtenção na prática (largura da rua e distância entre edificações).

Para o modelo de Marciel-Bertoni-Xia a influência da parâmetro da altura da antena cliente teve pouco sensibilidade. Assim sendo, os resultados se apresentaram coerentes apenas na faixa de distância entre 480 e 750 metros.

O modelo simplificado de Xia não apresentou bons resultados, mesmo com a mudança da distância entre as edificações e altura das antenas clientes. Esse fato se deve à componente da equação, igualada a zero, que descreve a atenuação do nível do sinal entre o topo da edificação e o nível do solo.

O modelo de Bertoni adaptado tem como principal característica o índice de atenuação por múltiplas difrações, Q . Nesse modelo é proposto uma mudança do valor de Q para incorporar a variação aleatória das edificações, entre 6 e 14 m. Contudo, no ambiente urbano analisado a maior parte das edificações possuem um pavimento entre 5 e 7 m. Com isso, os resultados foram pouco satisfatórios.

Os modelos de Kitao e Ibrahim apresentaram bons resultados apenas em pequenas faixas de distância. O primeiro na parte final e o outro na parte inicial. O modelo de Ibrahim apresentou um comportamento interessante. Pois, enquanto que a maioria dos modelos analisados aqui, foi a parte inicial da região com resultados mais discrepantes. Fato que não ocorreu neste modelo.

Os modelos de Walfisch-Bertoni e de Crosby foram os modelos que apresentaram melhores resultados comparados com os valores medidos.

No modelo de Crosby, as curvas do gráfico representam a variação entre as alturas mínimas e máximas das antenas clientes e os melhores resultados foram obtidos para uma variação de 3 metros.

No modelo de Walfisch-Bertoni os melhores resultados foram obtidos quando se considerou o termo " A "(3.28) como sendo igual a zero. Essa consideração é coerente porque o parâmetro " A " é a componente de perda do sinal entre o topo do edifício e a região próxima ao solo (situação comum na telefonia celular).

A flutuação dos pontos sobre a curva, nos dois modelos, se deve à variação nas alturas das antenas clientes, perdas nos cabos (comprimentos diferentes do adotado em Gt) e à exatidão do GPS.

O bom resultado com o modelo de Walfisch-Bertoni se deve também à maior similaridade do modelo com a situação avaliada. Em (CHUNG; BERTONI, 1993), o próprio Bertoni faz uma previsão da necessidade do modelamento das perdas de propagação numa situação de serviços para assinantes residenciais com antenas localizadas no topo das edificações. Esse fato reforçado pelos bons resultados obtidos, leva a que esse modelo seja o que melhor se adequa para modelagem das perdas de propagação em ambiente urbano avaliado neste trabalho.

O modelo de dois raios apresentou o melhor resultado no enlace repetidora Esperança - repetidora Areia, erro aproximado de 23,82% (9,5 dB). No entanto, nesse enlace, não foi possível a obtenção de todos os dados de topografia, servindo, apenas, para comparação qualitativa do enlace avaliado. Nos outros dois enlaces, os erros cometidos com o modelo de dois raios foram bem maiores. Isto seria minimizado se fossem consideradas, nos pontos críticos do enlace, não só a leitura feita do GPS, mas também as alturas das edificações no local. Este fato acarretaria a diminuição ainda mais das perdas de propagação e conseqüentemente o erro entre o valor medido e o previsto.

O modelo de Egli apresentou bons resultados nos enlaces ERB Esperança - ERB Areial e Repetidora Esperança - Repetidora Areia, com erros de 9,83% (7,3 dB) e 35,92% (13,08 dB) respectivamente. Considerando-se a exatidão do GPS, a exatidão dos equipamentos de medidas e a faixa de validade dos parâmetros do modelo, o resultado obtido foi bastante satisfatório. No enlace ERB Campina Grande - Repetidora Lagoa Seca o erro utilizando o modelo de Egli foi muito alto 74,87% (28,51 dB).

O modelo de Blomquist-Ladell apresentou ótimos resultados e o erro nos três enlaces foram de aproximadamente - 2,39% (2 dB) no enlace ERB Esperança - ERB Areial, 10,52% (4,7 dB) para Repetidora Esperança - Repetidora Areia e de 16,12% (9,25 dB) e 13,86% (8,10 dB) para o enlace ERB Campina Grande - Repetidora Lagoa Seca.

O modelo Lee também apresentou bons resultados nos três enlaces: O erro foi de aproximadamente 13,47% (9,68 dB), 6,51% (3,45 dB) e 25,50% (13,53 dB) nos enlaces ERB Esperança - ERB Areial, Repetidora Esperança - Repetidora Areia e ERB Campina Grande - Repetidora Lagoa Seca respectivamente.

Verificou-se que o modelo de Blomquist-Ladell foi o que apresentou menores erros percentuais nos três enlaces. Isso comprova a boa aproximação obtida com o modelo nos projetos de rádio enlace. Além disso, é importante destacar que o resultados foram obtidos em situações reais com enlaces em pleno funcionamento com uma função bem específica de prover acesso a Internet em banda larga para localidade desprovidas de tal benefício. Os demais modelos de propagação apresentaram resultados coerentes apenas sobre situações particulares e com varias considerações, necessitando de uma análise mais detalhada principalmente nas regiões onde ocorre obstrução da primeira zona de Fresnel.

7.1 Propostas de trabalhos futuros

Podem ser apontadas as seguintes propostas de continuação do trabalho:

- Realização dos mesmos procedimentos realizados aqui, mas utilizando um analisador de espectro e um GPS de melhor exatidão para realização das medições.
- Aumentar a quantidade de usuários, pontos de medição.
- Incluir distância maiores e menores que as analisadas aqui.
- Fazer um levantamento mais detalhado dos parâmetros de topografia da cidade, largura de rua e distâncias entre edificações, e suas alturas médias. Esse processo seria viável por se tratar de uma cidade de pequeno porte.

- Realizar testes em uma torre de uma ERB celular com equipamentos de rede sem fio de computadores instalados. Esse seria um trabalho interessante devido a convergência cada vez maior de mídias e tecnologias nos celulares.
- Realizar medições com uma unidade móvel, por exemplo um notebook dentro de uma carro.
- Realizar medições em ambientes urbanos com uma cidade com densidade populacional maior.
- Estudo matemático mais aprofundado dos modelos, para obtenção de um modelo que melhor se ajuste as condições de transmissão de dados de uma rede de computadores sem fio.

Apêndice A

Espectro de frequência dos canais da rede sem fio (2 à 11)

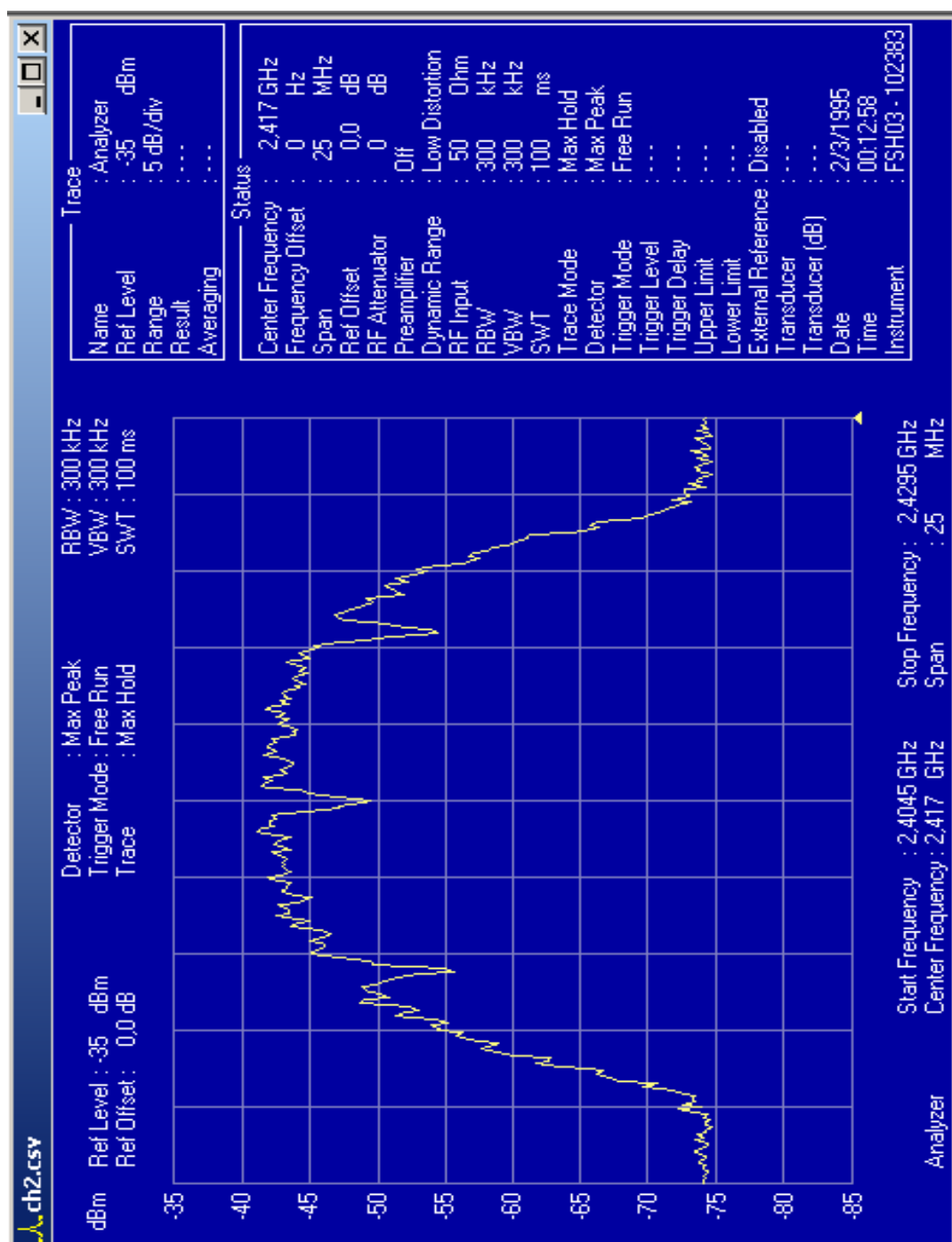


Figura A.1: Tela capturada pelo FSH View - Espectro de Frequência para o canal 2 (2417 MHz)

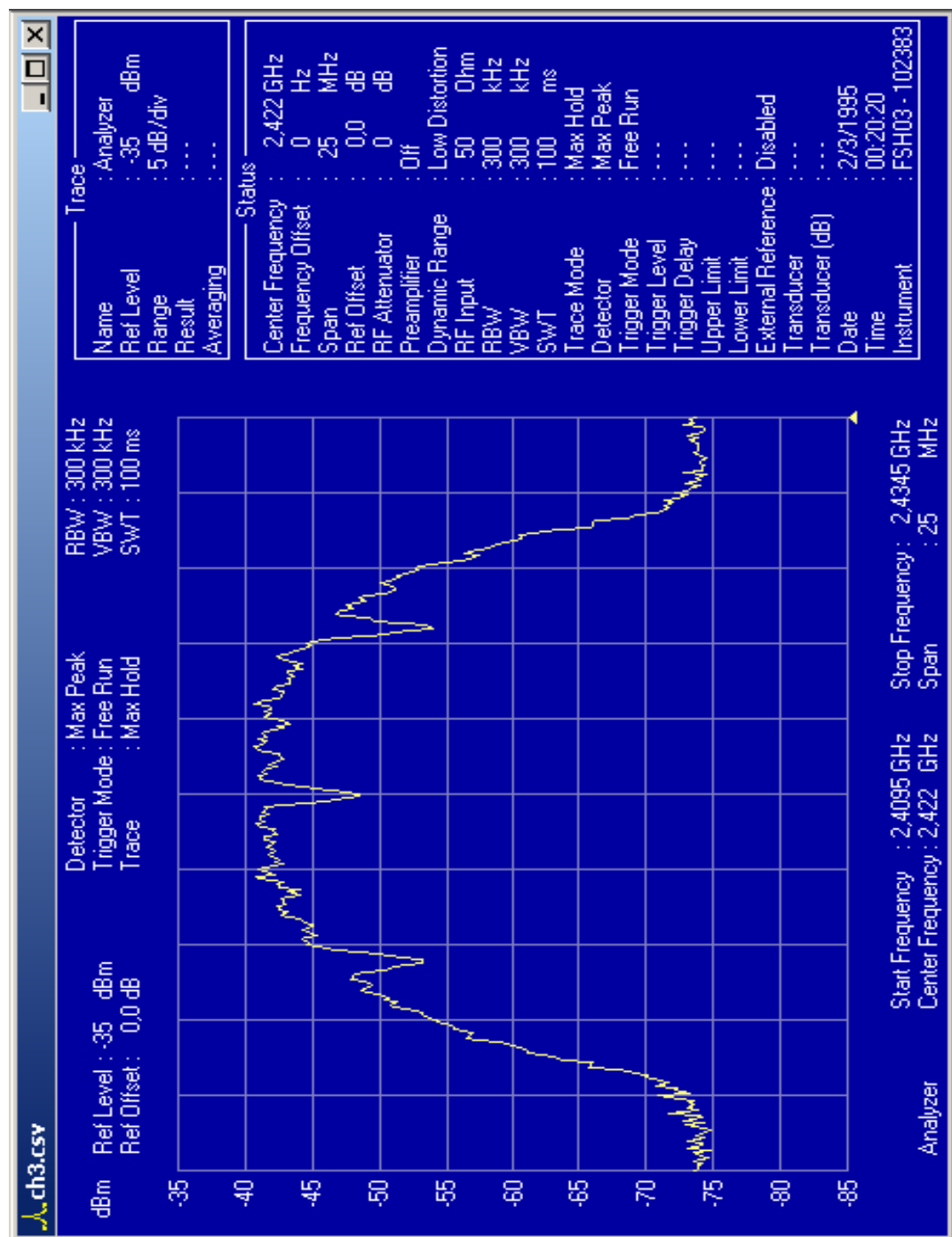


Figura A.2: Tela capturada pelo FSH View - Espectro de Frequência para o canal 3 (2422 MHz)

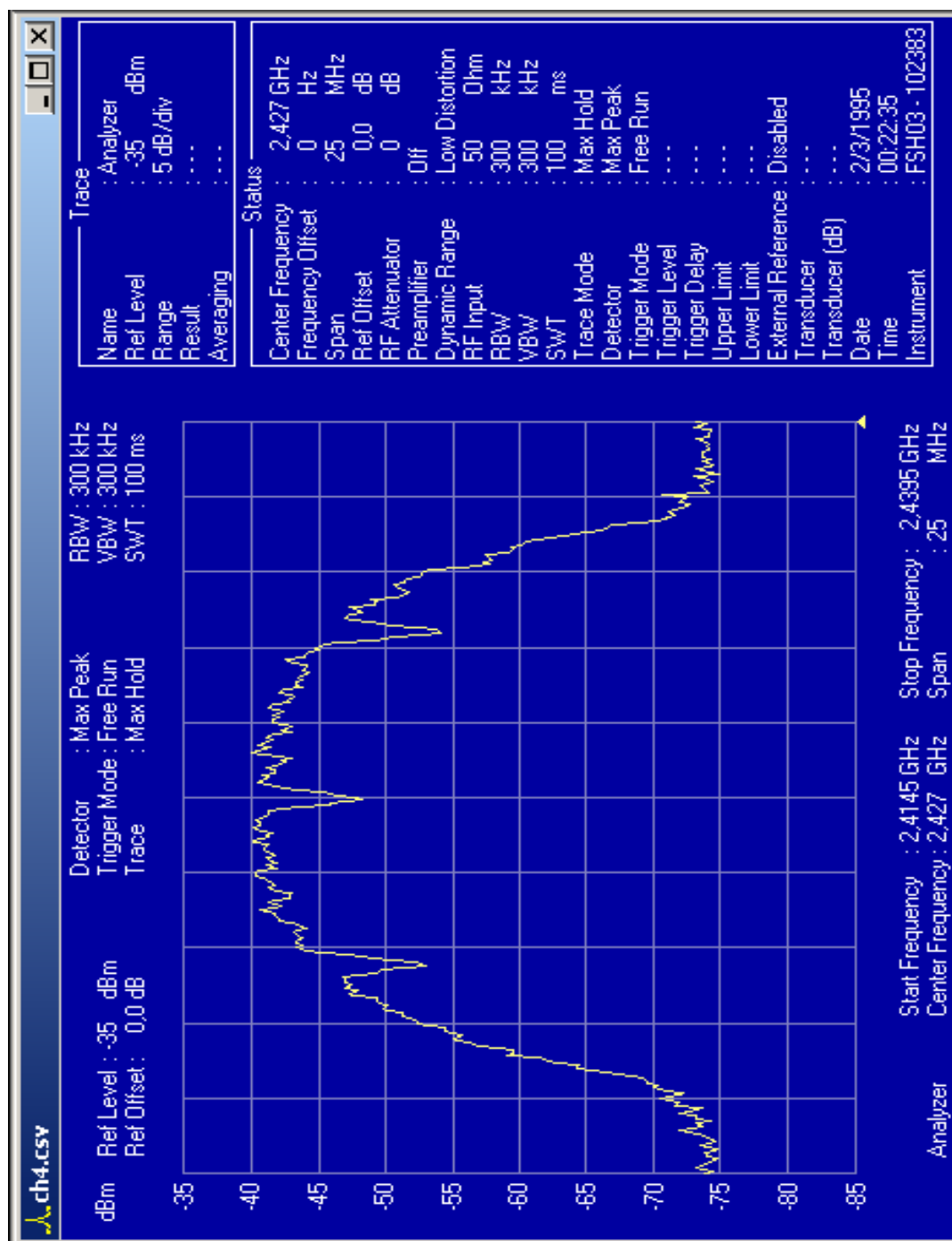


Figura A.3: Tela capturada pelo FSH View - Espectro de Frequência para o canal 4 (2427 MHz)

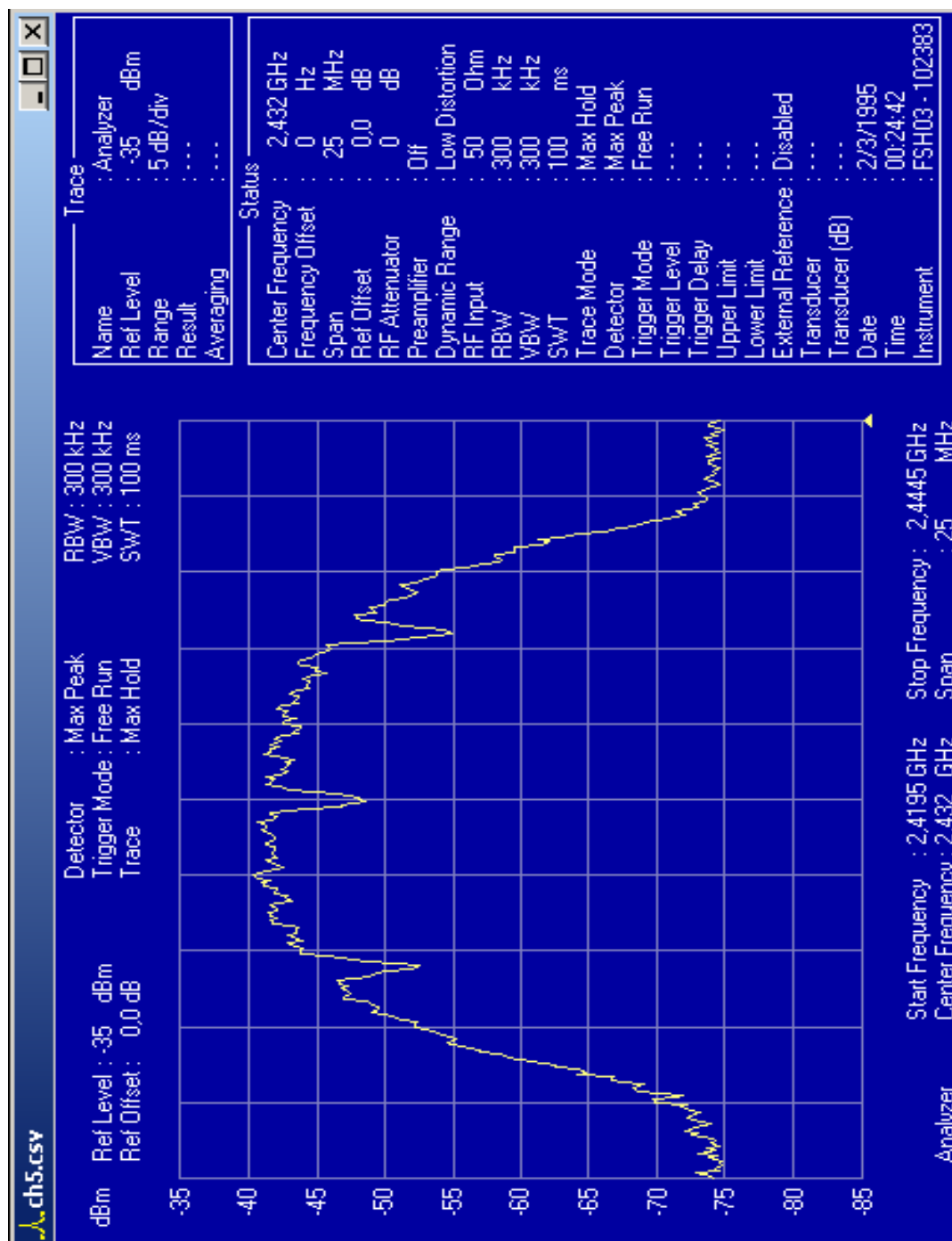


Figura A.4: Tela capturada pelo FSH View - Espectro de Frequência para o canal 5 (2432 MHz)

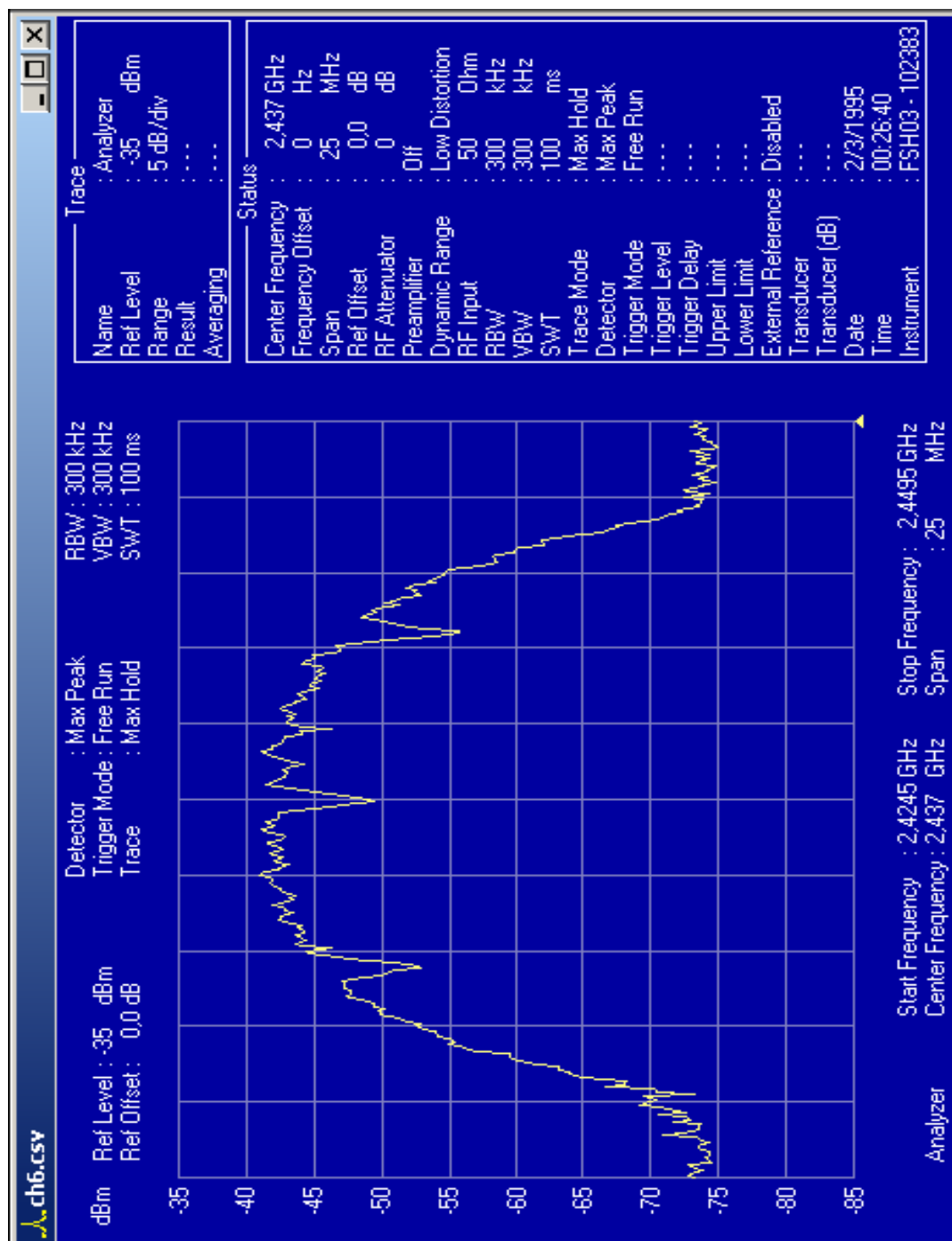


Figura A.5: Tela capturada pelo FSH View - Espectro de Frequência para o canal 6 (2437 MHz)

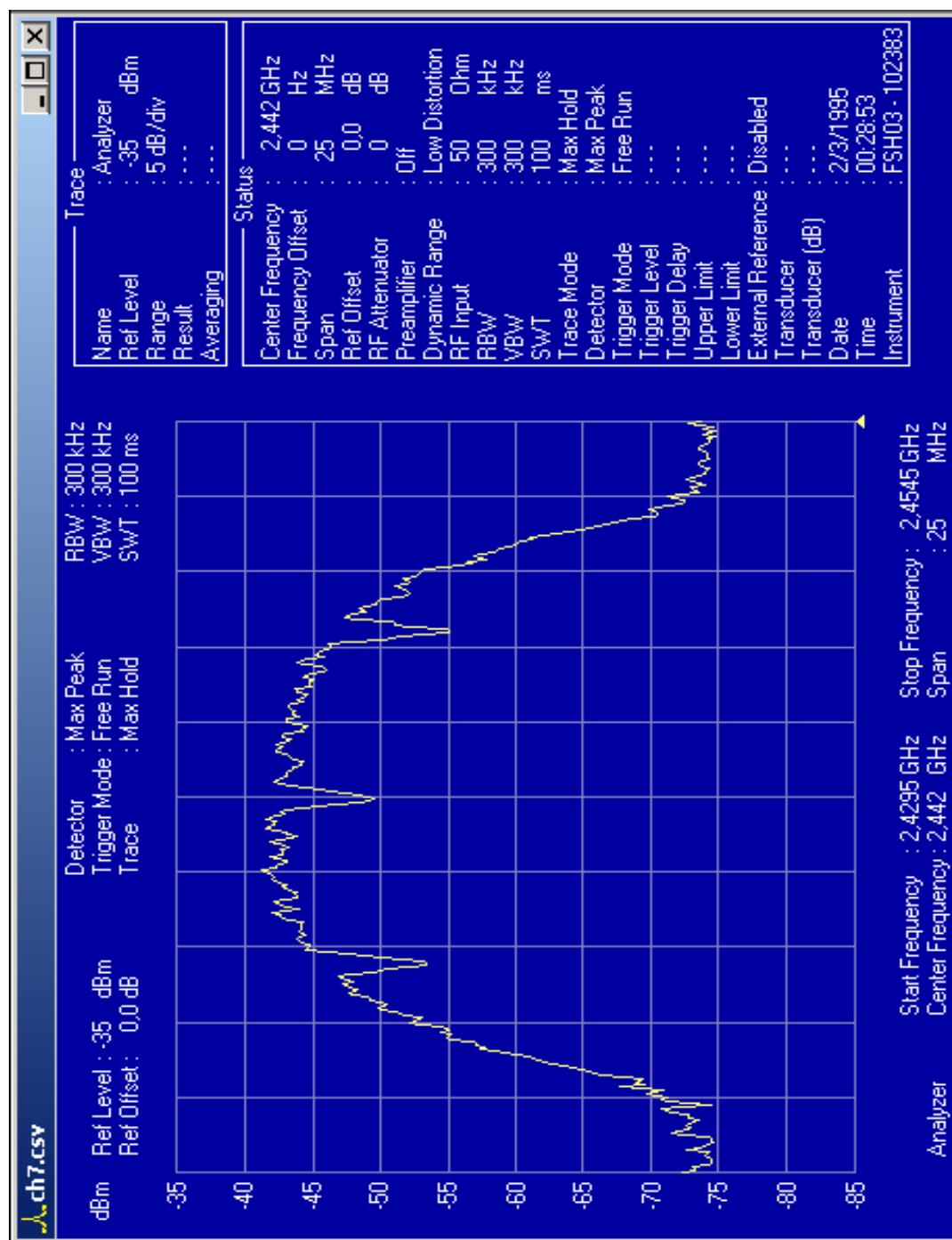


Figura A.6: Tela capturada pelo FSH View - Espectro de Frequência para o canal 7 (2442 MHz)

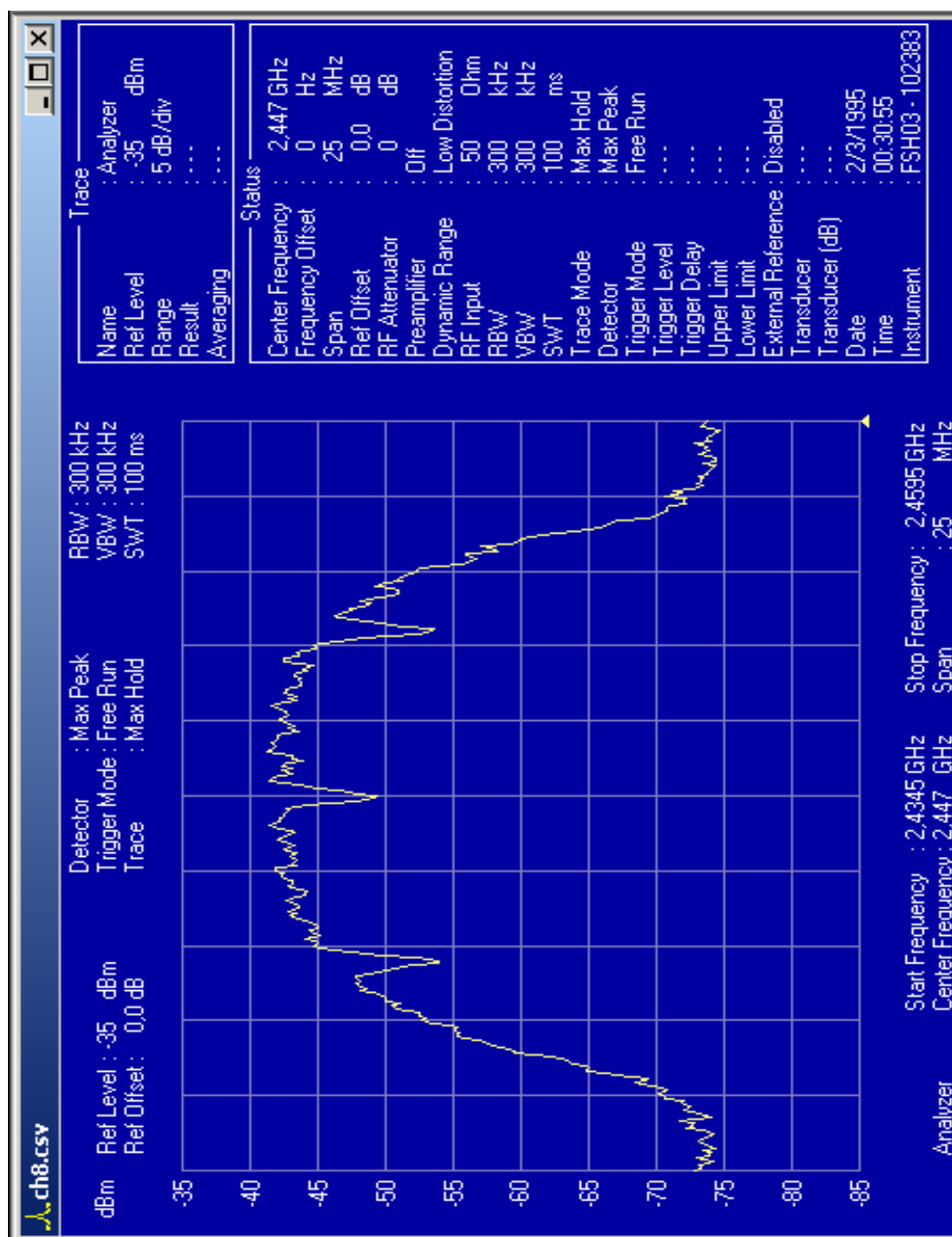


Figura A.7: Tela capturada pelo FSH View - Espectro de Frequência para o canal 8 (2447 MHz)

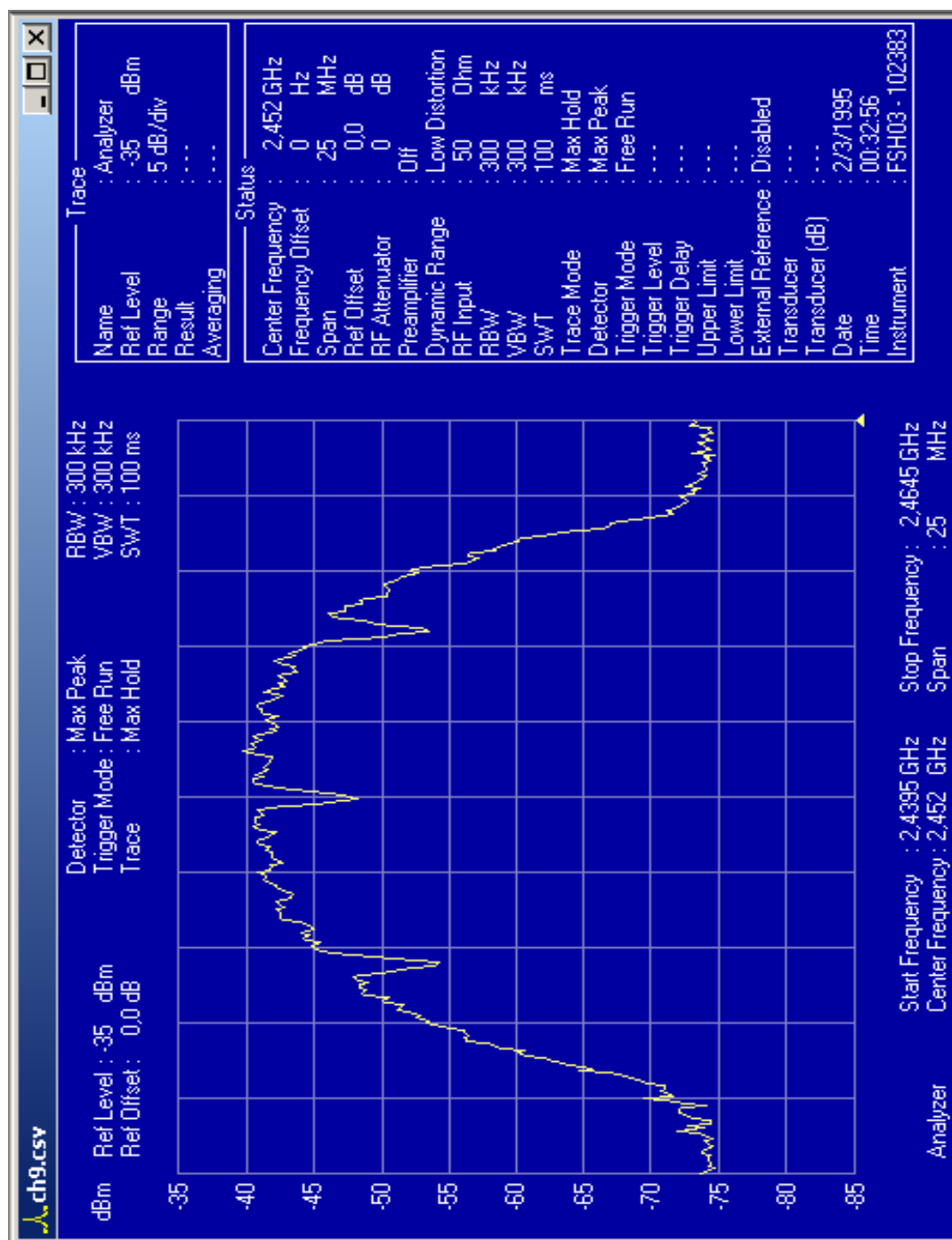


Figura A.8: Tela capturada pelo FSH View - Espectro de Frequência para o canal 9 (2452 MHz)

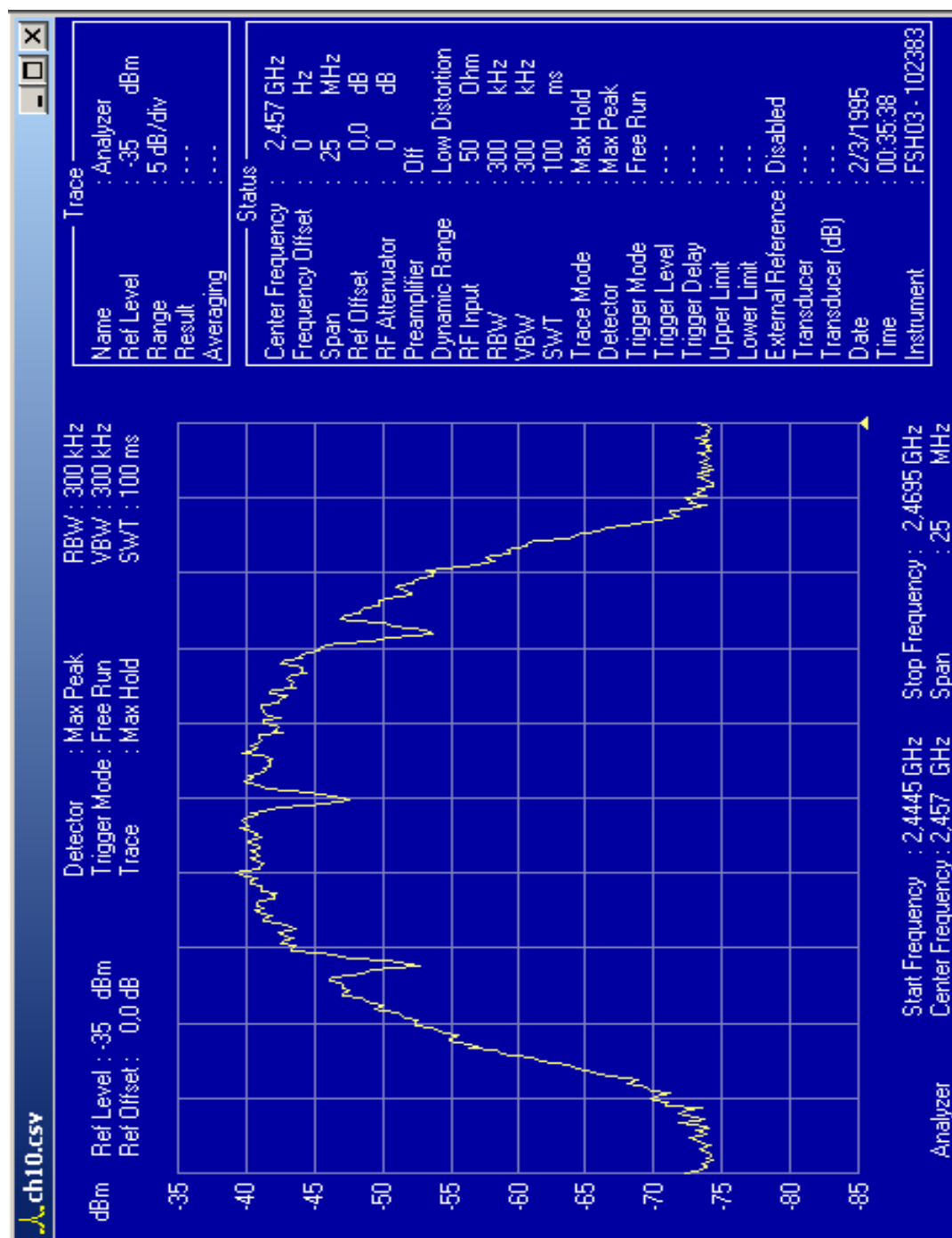


Figura A.9: Tela capturada pelo FSH View - Espectro de Frequência para o canal 10 (2457 MHz)

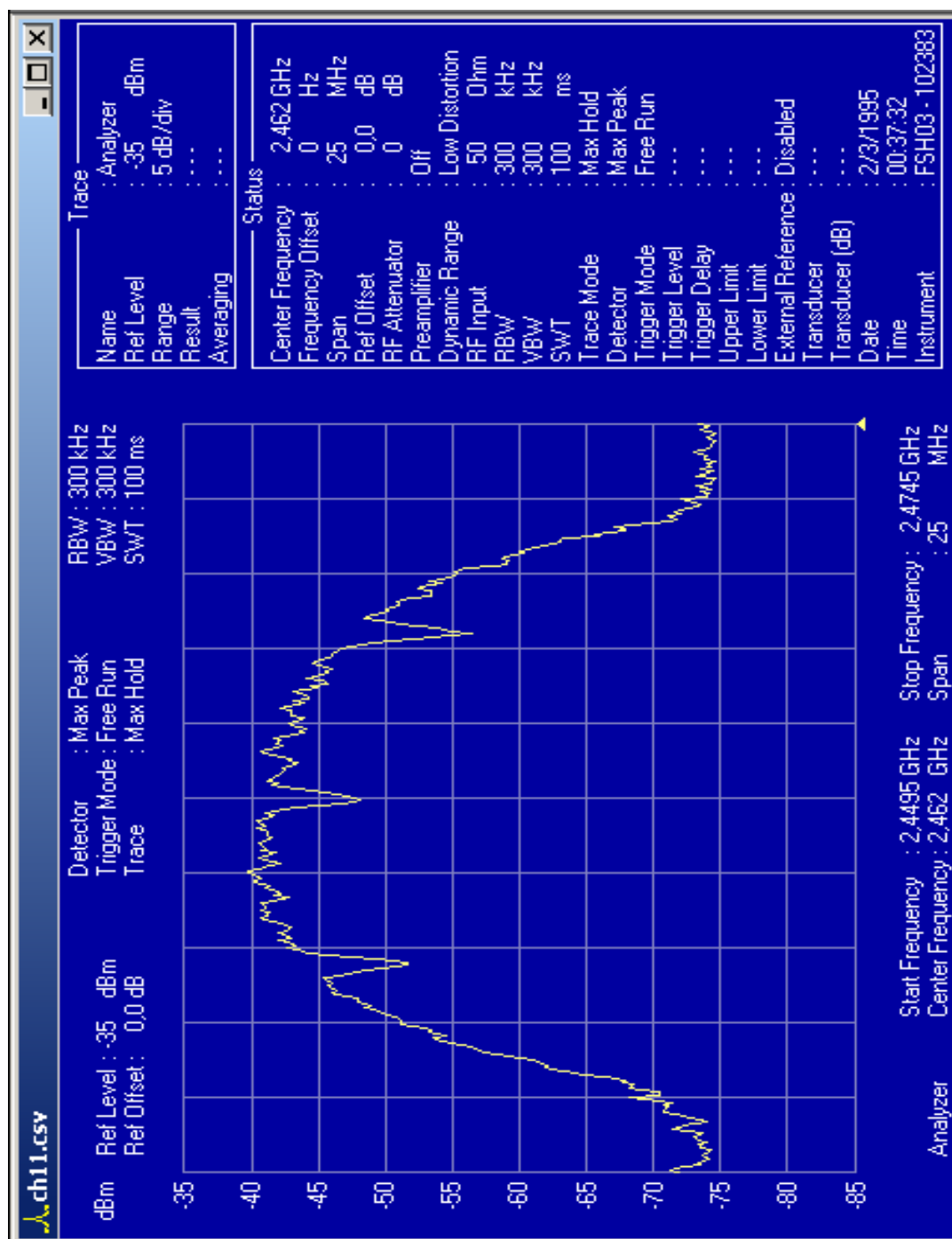


Figura A.10: Tela capturada pelo FSH View - Espectro de Frequência para o canal 11 (2462 MHz)

Apêndice B

Níveis de potência para os canais 2 a 11

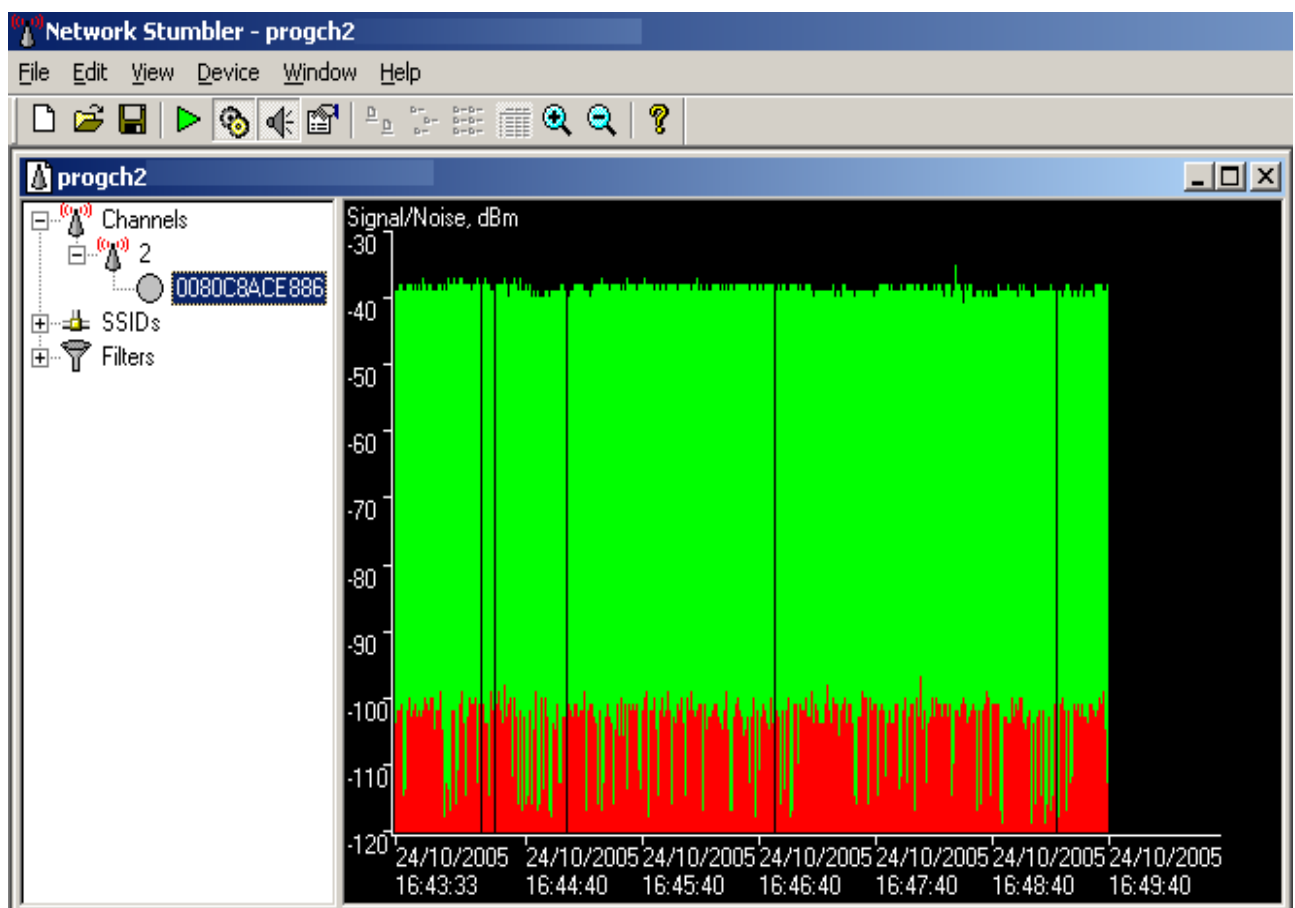


Figura B.1: Resultado obtido utilizando a montagem do sistema proposto para o canal 2 (2417 MHz)

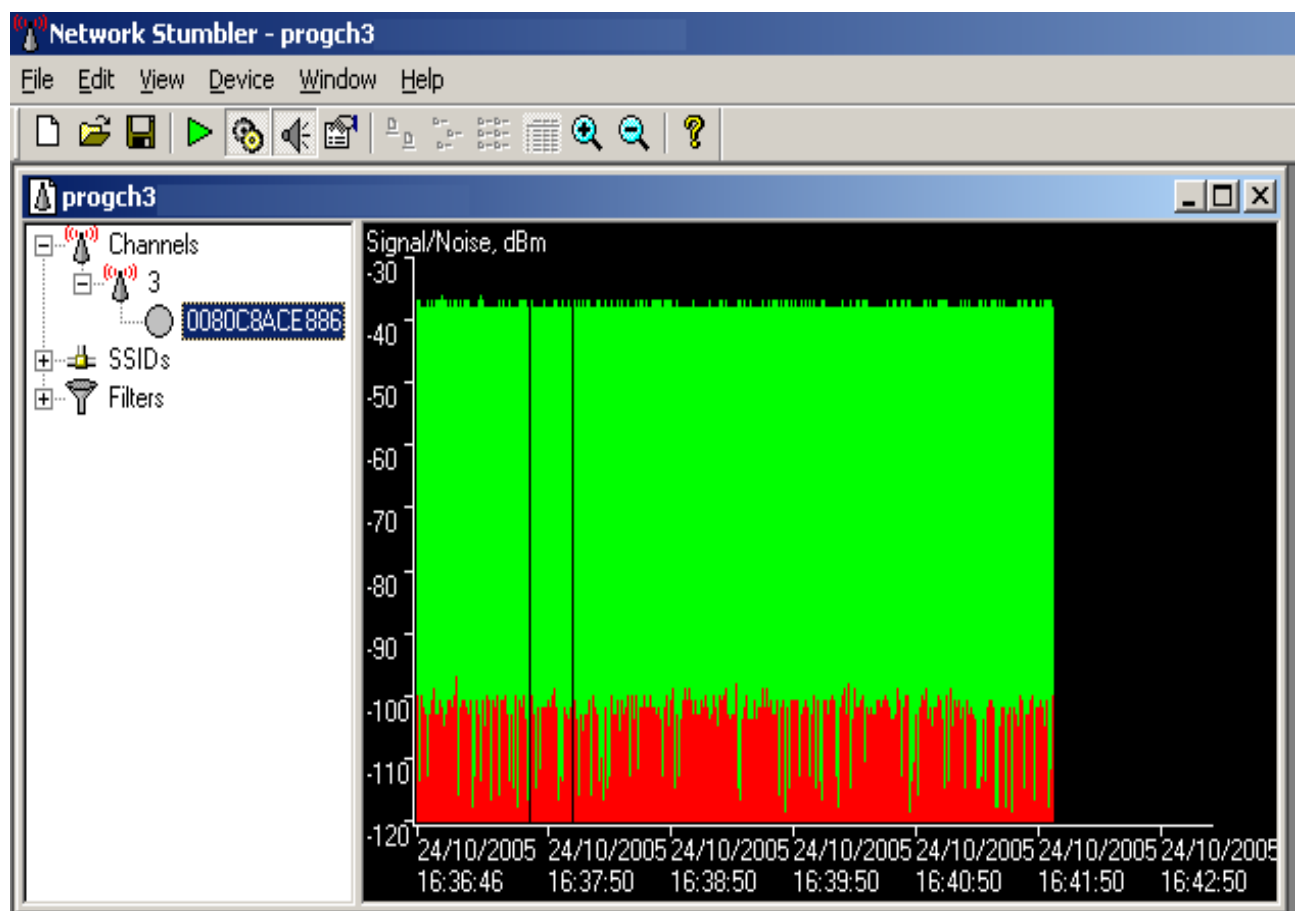


Figura B.2: Resultado obtido utilizando a montagem do sistema proposto para o canal 3 (2422 MHz)

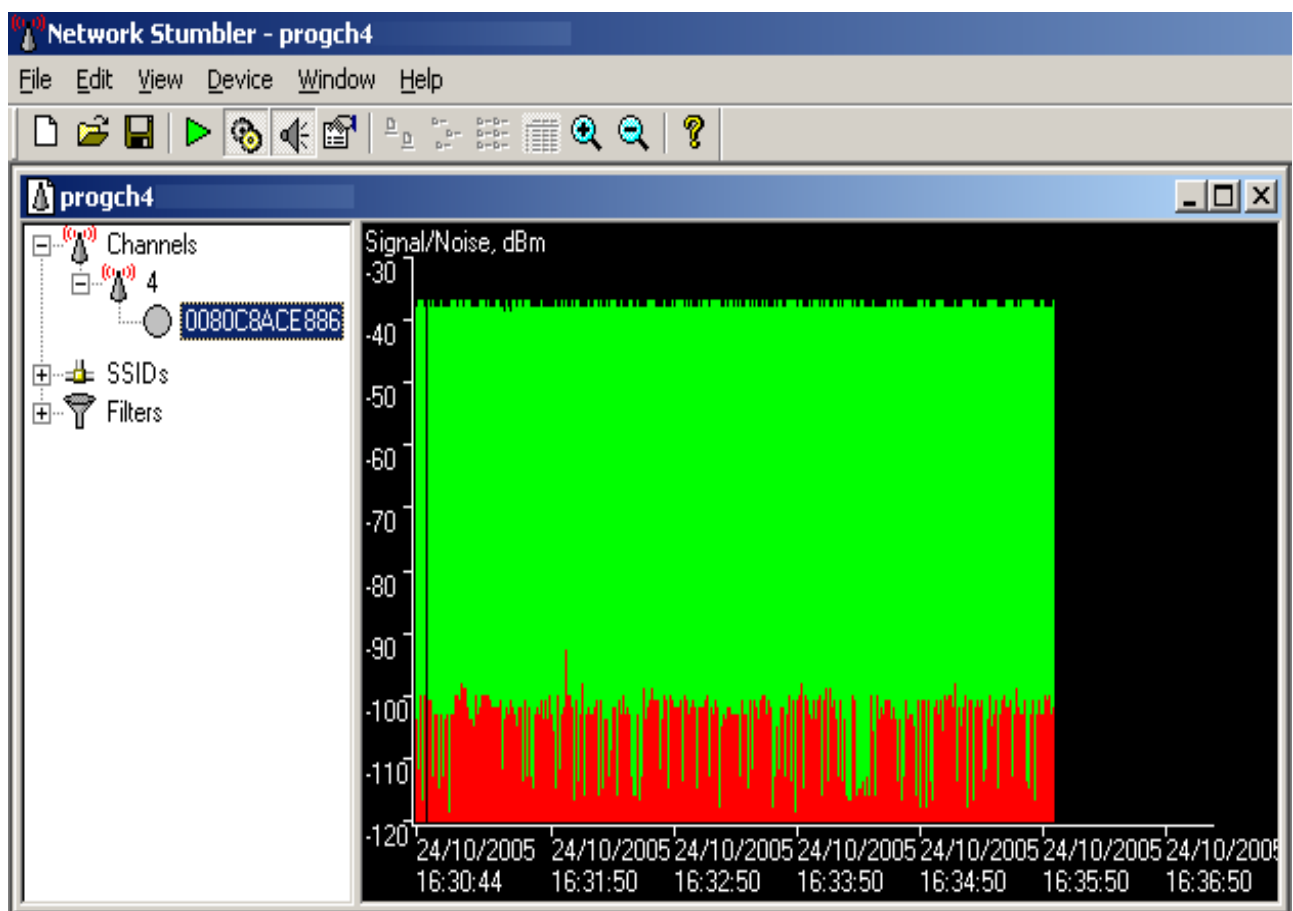


Figura B.3: Resultado obtido utilizando a montagem do sistema proposto para o canal 4 (2427 MHz)

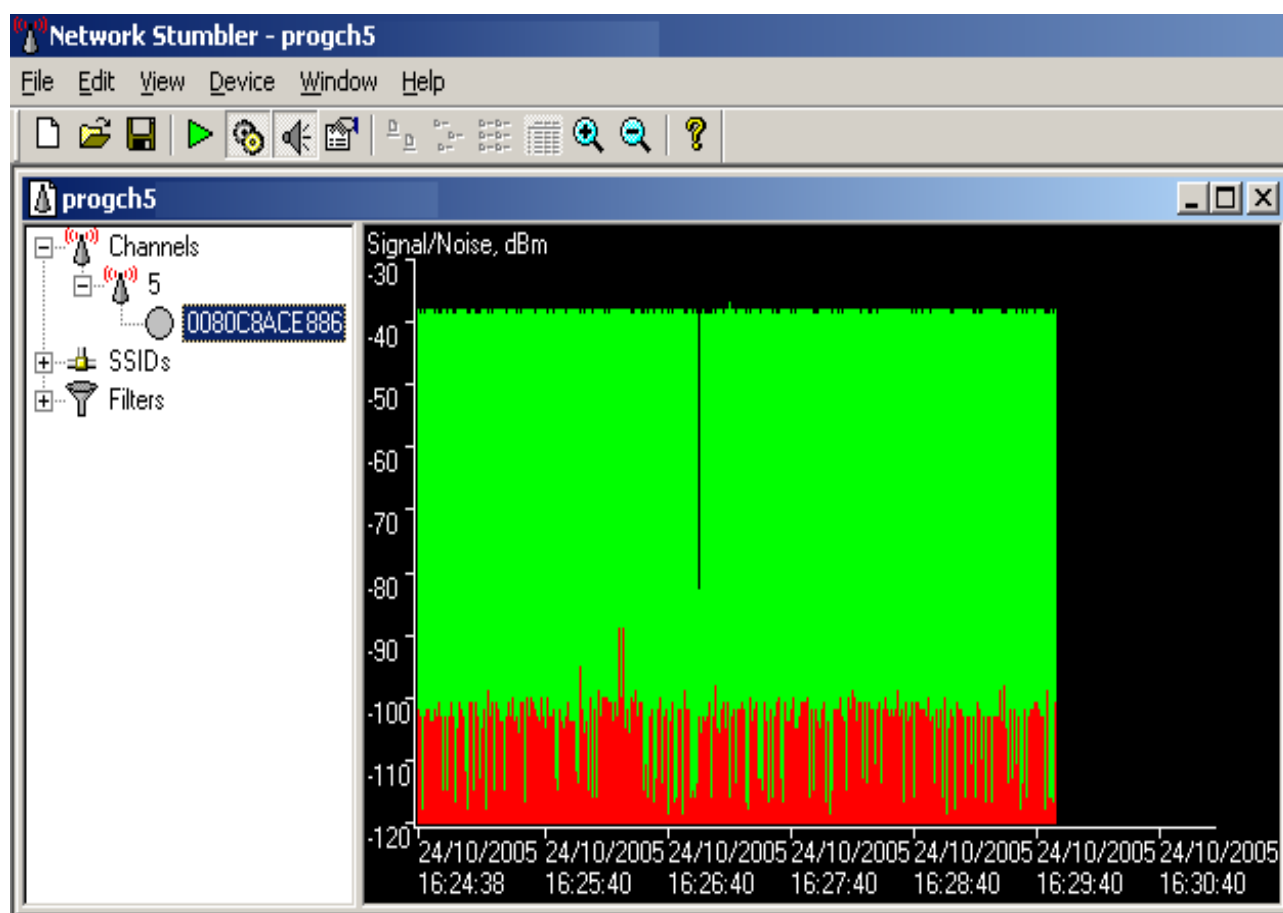


Figura B.4: Resultado obtido utilizando a montagem do sistema proposto para o canal 5 (2432 MHz)

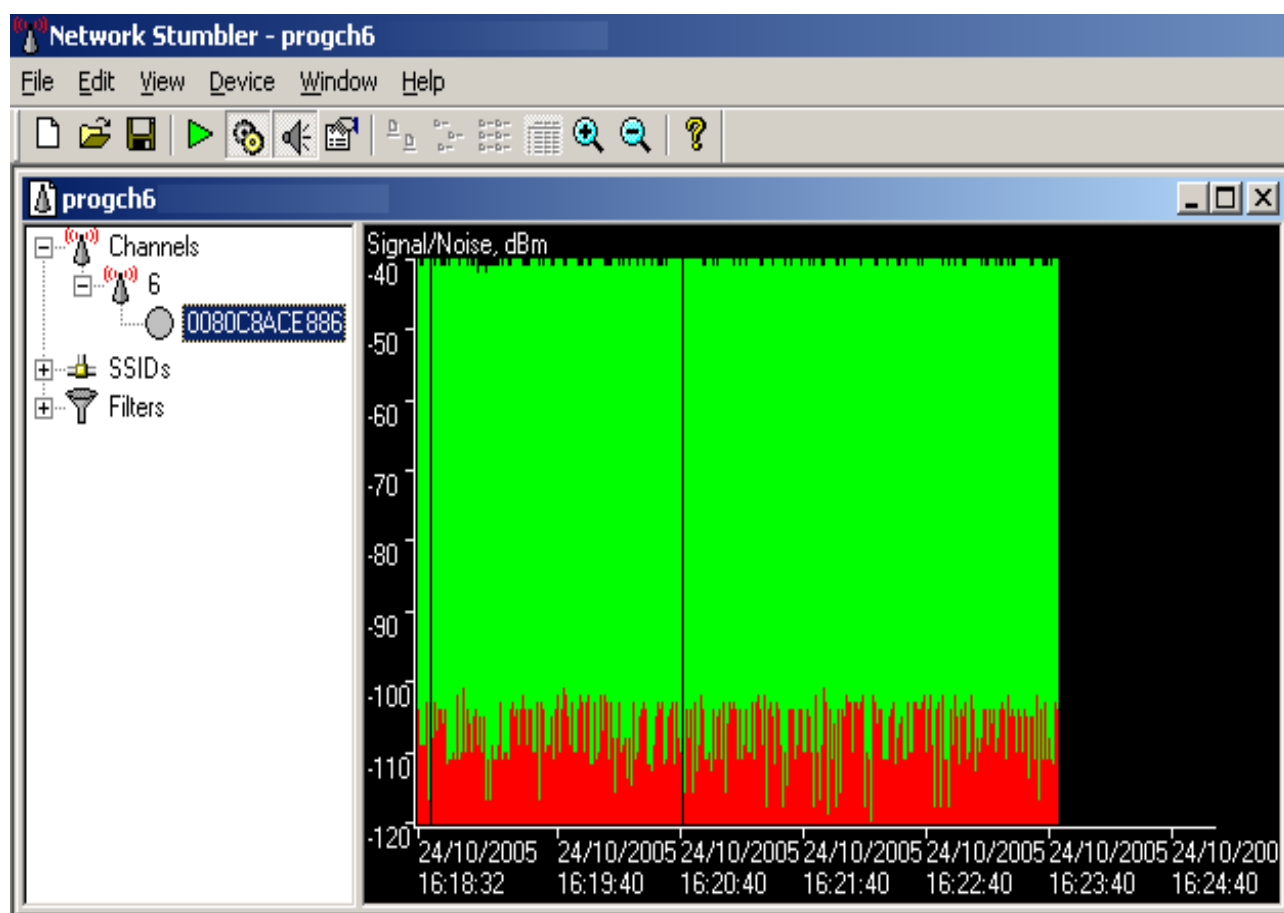


Figura B.5: Resultado obtido utilizando a montagem do sistema proposto para o canal 6 (2437 MHz)

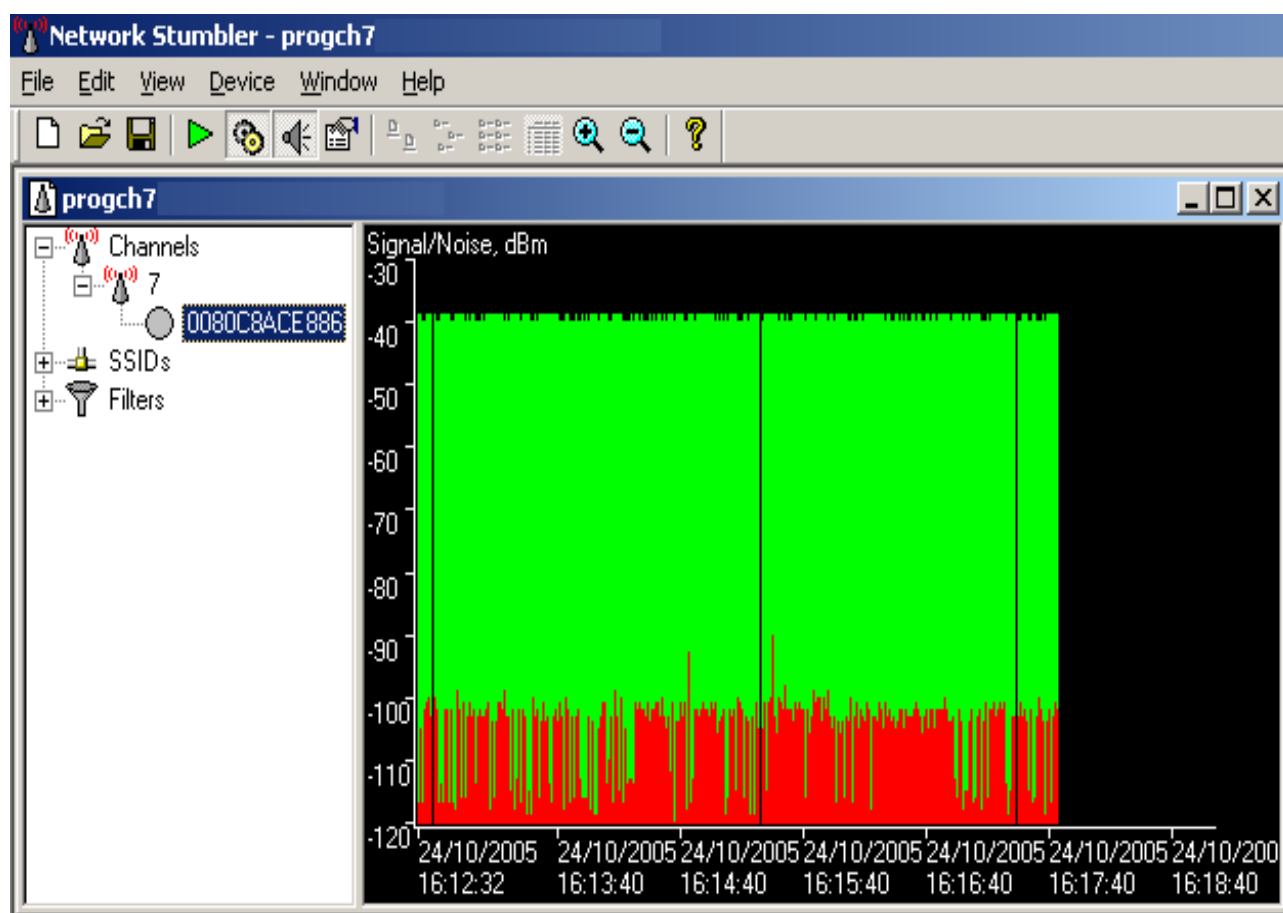


Figura B.6: Resultado obtido utilizando a montagem do sistema proposto para o canal 7 (2442 MHz)

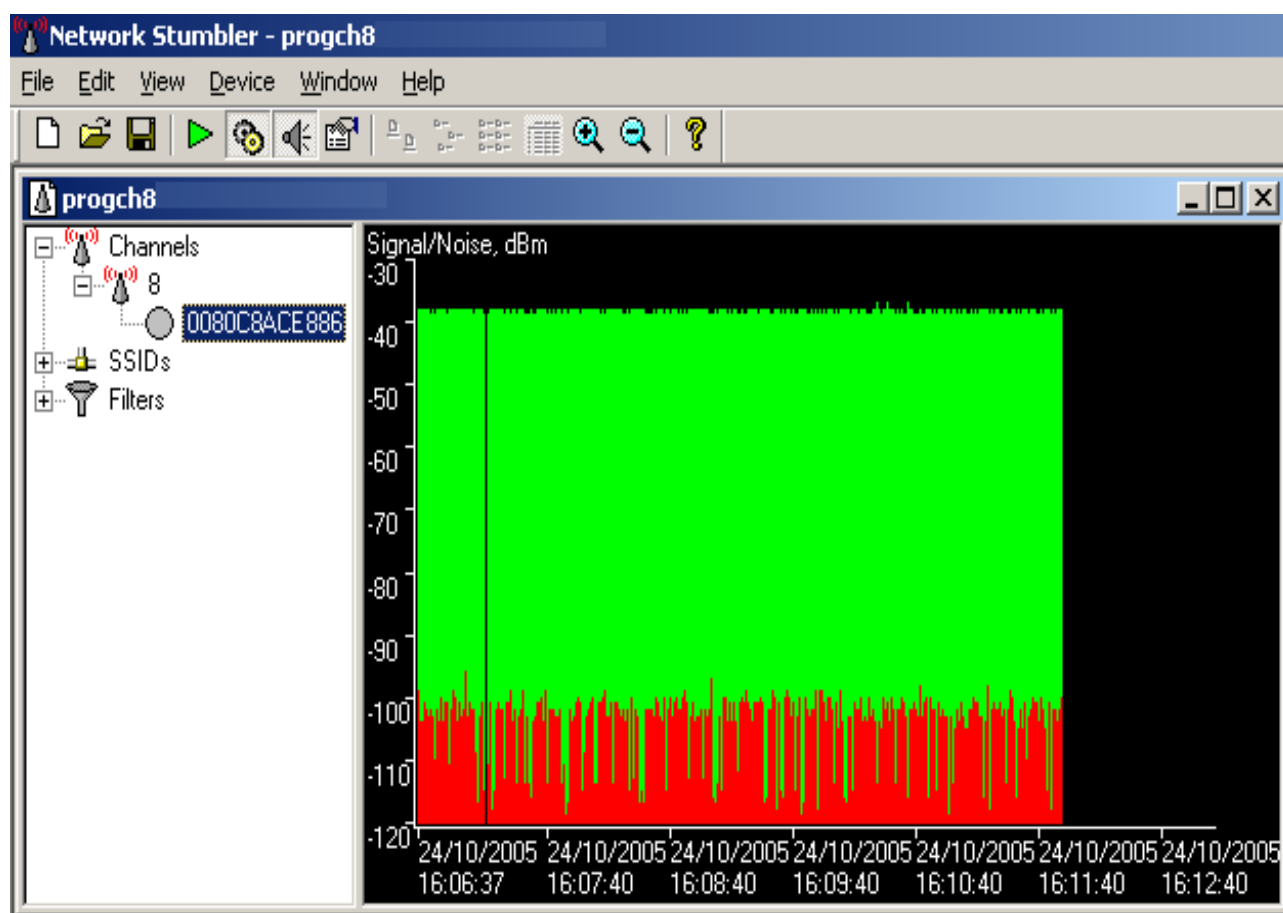


Figura B.7: Resultado obtido utilizando a montagem do sistema proposto para o canal 8 (2447 MHz)

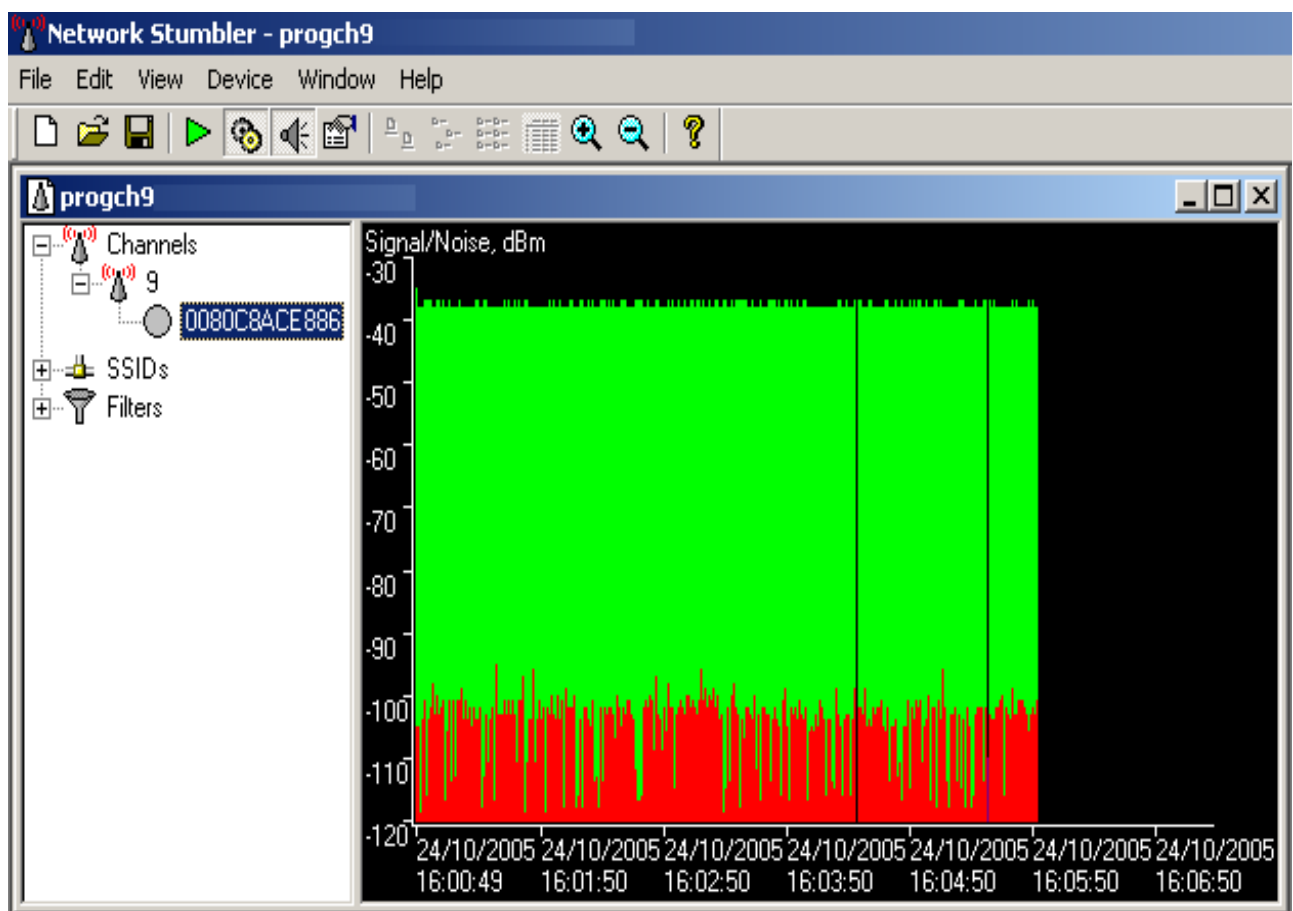


Figura B.8: Resultado obtido utilizando a montagem do sistema proposto para o canal 9 (2452 MHz)

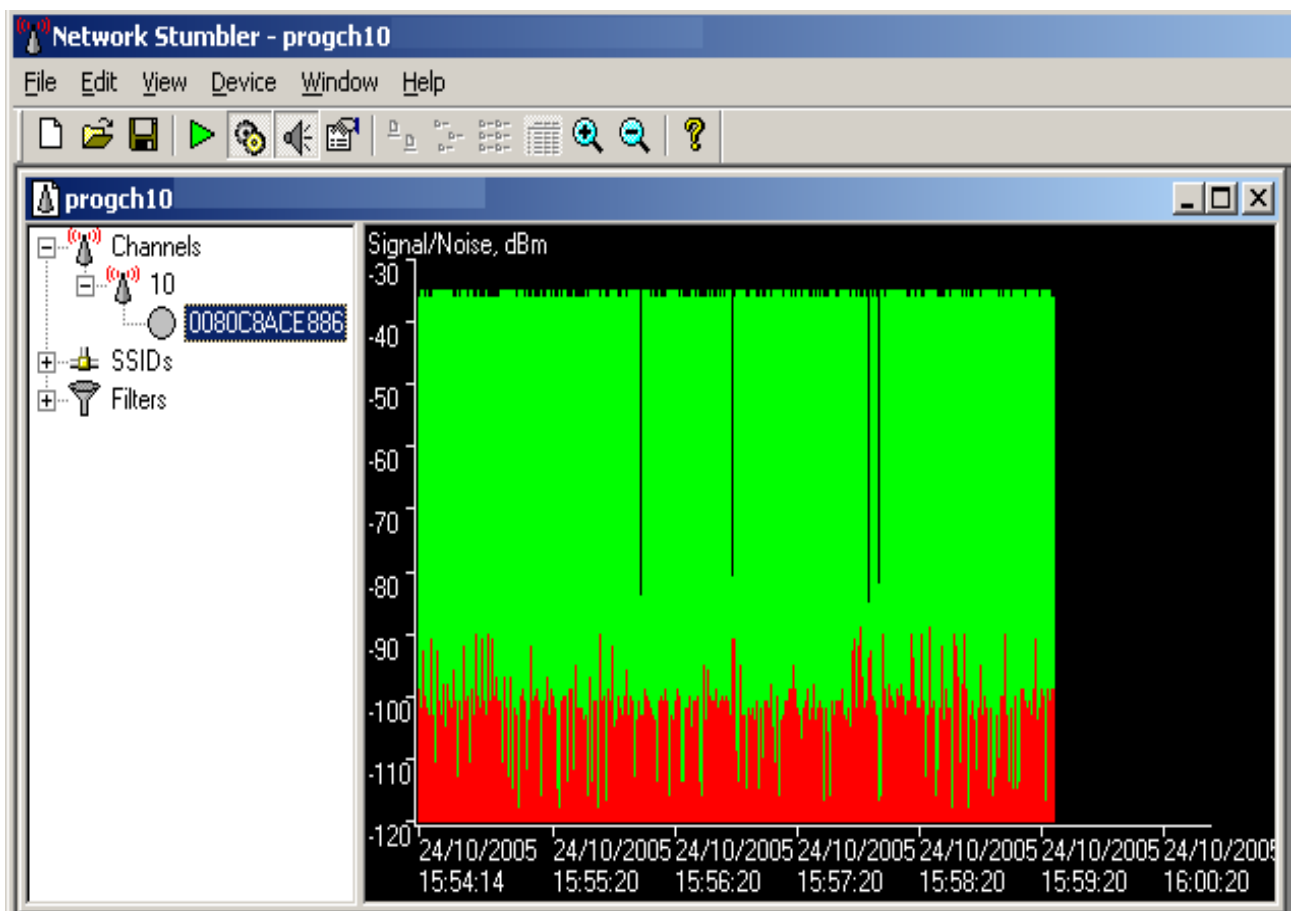


Figura B.9: Resultado obtido utilizando a montagem do sistema proposto para o canal 10 (2457 MHz)

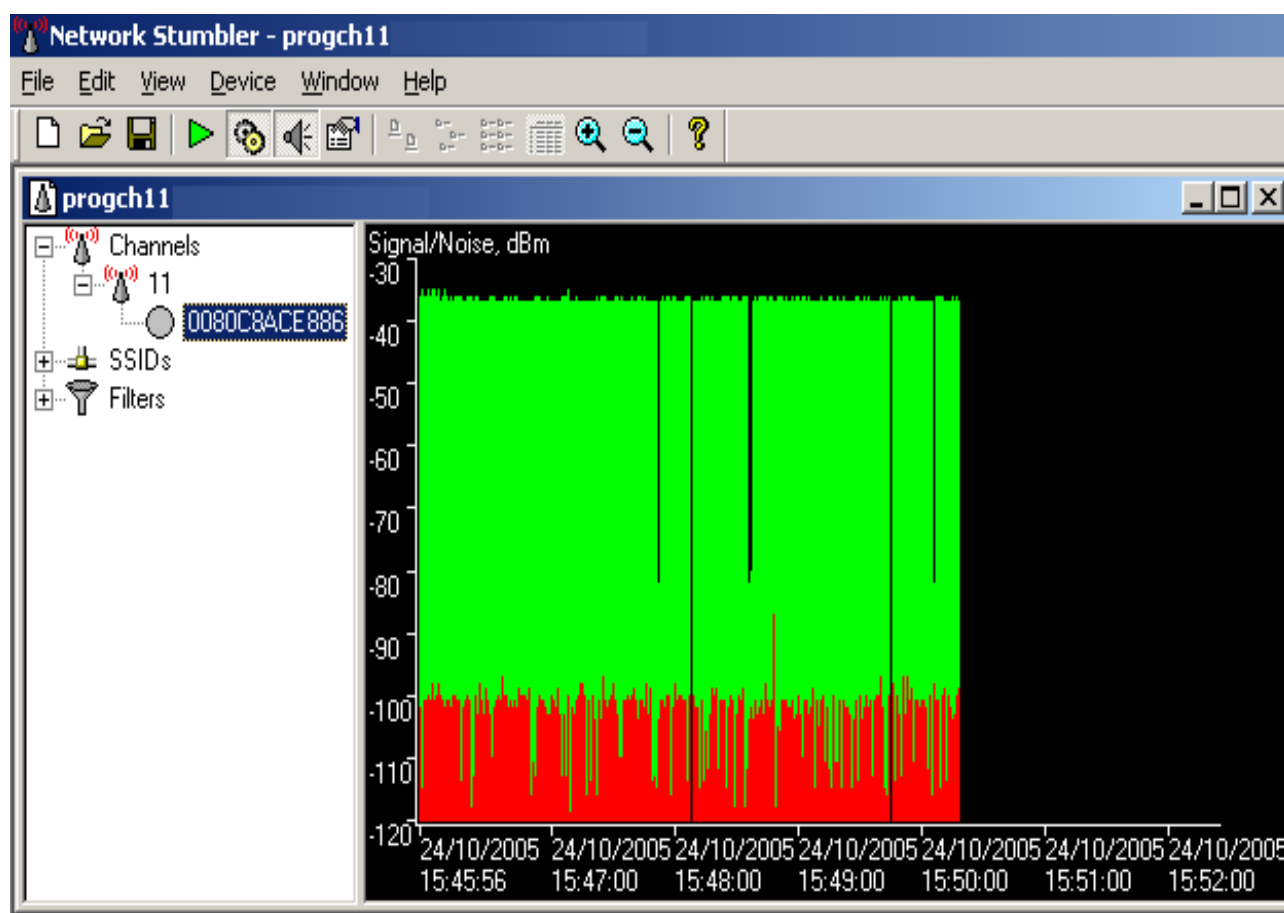


Figura B.10: Resultado obtido utilizando a montagem do sistema proposto para o canal 11 (2462 MHz)

Apêndice C

Continuação dos dados coletados nos usuários

Usuário	5	6	7	8
S (sul)	S 7,016384002°	S 7,0184333°	S 7,017966418°	S 7,017690493°
W (oeste)	W 35,86072441°	W 35,85783°	W 35,86232621°	W 35,86167686°
Altura (m)	655,3	634,10	631,2	640,30
Precisão do GPS (3D)	9,3 m	7,2 m	14,2 m	11,3 m
SNR (dB)	13,48193	8,63141	25,25253	18,58421
Nível de Sinal (dBm)	-73,85542	-78,48718	-69,80808	-77,82632
Nível de Ruído (dBm)	-87,337349	-87,11859	-95,06061	-96,41053
N de Medidas	165	311	197	189
Tamanho do Cabo	9	20	5	6
Delta H (m)	4	12	4	5

Tabela C.1: Dados coletados - continuação

Usuário	9	10	11	12
S (sul)	S 7,0196833°	S 7,022295569°	S 7,016716926°	S 7,020511132°
W (oeste)	W 35,858433°	W 35,85267271°	W 35,85574756°	W 35,85790416°
Altura (m)	651,2	641,3	638,9	635,2
Precisão do GPS (3D)	10,2 m	10,9 m	7,7 m	8,8 m
SNR (dB)	31,46599	14,87821	21,34211	21,39306
Nível de Sinal (dBm)	-55,90428	-81,64744	-73,28421	-73,79769
Nível de Ruído (dBm)	-87,37027	-96,52565	-94,62632	-95,19075
N de Medidas	396	155	189	172
Tamanho do Cabo	5	10	2	6
Delta H (m)	4	6	3	5

Tabela C.2: Dados coletados - continuação

Usuário	13	14	15	16
S (sul)	S 7,016731233°	S 7,019078527°	S 7,01605000°	S 7,022392545°
W (oeste)	W 35,85825212°	W 35,8584083°	W 35,8605000°	W 35,85977322°
Altura (m)	636,7	637,5	649,1	634,6
Precisão do GPS (3D)	8,2 m	9,2 m	8,1 m	7,6 m
SNR (dB)	19,07429	13,28455	7,498099	19,7125
Nível de Sinal (dBm)	-78,80571	-81,42276	-79,56654	-71,925
Nível de Ruído (dBm)	-97,88	-94,70731	-87,064639	-91,6375
N de Medidas	172	125	262	239
Tamanho do Cabo	10	8	6	5
Delta H (m)	6	5	7	3

Tabela C.3: Dados coletados - continuação

Usuário	17	18	19	20
S (sul)	S 7,019383333°	S 7,018357407°	S 7,018409235°	S 7,024370126°
W (oeste)	W 35,858733333°	W 35,85948132°	W 35,8591601°	W 35,86350444°
Altura (m)	643,2	636,2	6350,5	646,2
Precisão do GPS (3D)	10,3 m	8,2 m	7,8 m	6,9 m
SNR (dB)	15,63142	30,38043	25,91787	13,82692
Nível de Sinal (dBm)	-69,4139	-65,86957	-68,92754	-81,87821
Nível de Ruído (dBm)	-85,04532	-96,2500	-94,84541	-95,70513
N de Medidas	330	183	206	155
Tamanho do Cabo	6	5	5	8
Delta H (m)	6	6	6	7

Tabela C.4: Dados coletados - continuação

Apêndice D

Anexo - Cartas Topográficas

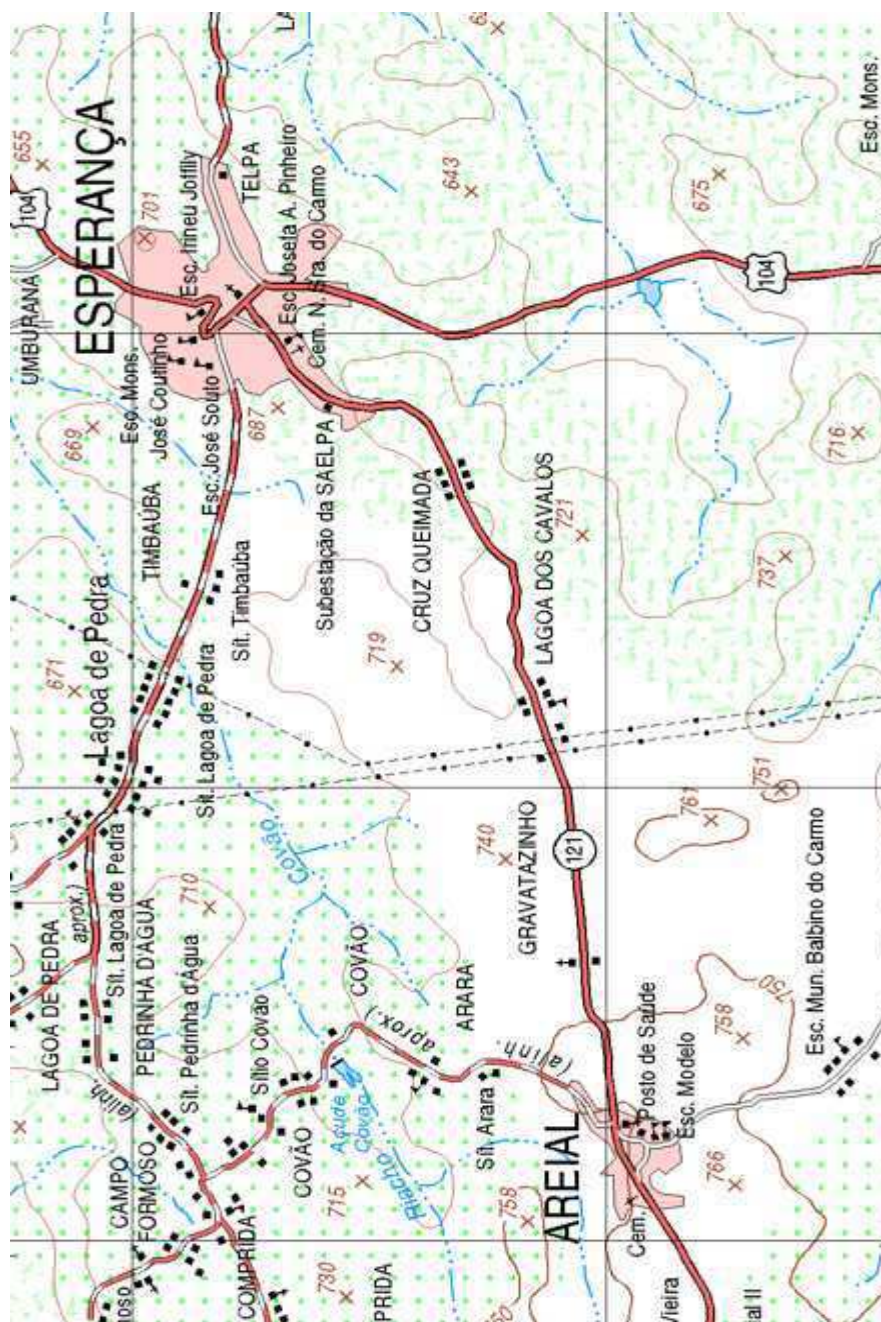


Figura D.1: Parte da carta topográfica SB.25-Y-C-I MI-1212 , região do enlace Esperança - Areial



Figura D.2: Parte da carta topográfica SB.25-Y-C-I MI-1212 , região do enlace Repetidora Esperança - Repetidora Areia



Figura D.3: Parte da carta topográfica SB.25-Y-C-I MI-1212 , região do enlace Campina Grande - Lagoa Seca

Apêndice E

Dados convertidos dos demais usuários da Tabela 6.2

Usuário	4	5	6
Altura registrada pelo GPS (m)	638,10	655,30	634,10
Delta H (m) (Altura da antena acima do GPS)	3,00	4,00	12,00
Nível de Sinal (dBm)	-76,56774	-73,85542	-78,48718
Ângulo θ (rad)	1,6933496	1,6932553	1,6932911
Ângulo ϕ (rad)	5,6573193	5,6572976	5,6573481
Raio total (m)	6.378.641,10	6.378.659,30	6.378.646,10
X_C (m)	5.130.835,3246469	5.130.828,9917253	5.130.983,1315221
Y_C (m)	-3.708.578,3013258	-3.708.743,3362490	-3.708.460,1360202
Z_C (m)	-779.768,0019727	-779.173,4010964	-779.398,2246768
Distância ERB Cliente (m)	210,473211	493,6171641	208,4506155

Tabela E.1: Dados convertidos dos demais usuários

Usuário	7	8	9
Altura registrada pelo GPS (m)	631,20	640,30	651,20
Delta H (m) (Altura da antena acima do GPS)	4,00	5,00	4,00
Nível de Sinal (dBm)	-69,80808	-77,82632	-55,90428
Ângulo θ (rad)	1,6932829	1,6932781	1,6933129
Ângulo ϕ (rad)	5,6572696	5,6572810	5,6573376
Raio total (m)	6.378.635,20	6.378.645,30	6.378.655,20
X_C (m)	5.130.936,5047270	5.131.137,6502384	5.130.620,8113930
Y_C (m)	-3.708.860,1544198	-3.708.810,0778124	-3.708.509,4652202
Z_C (m)	-779.345,3051386	-779.316,0510197	-779.537,4543311
Distância ERB Cliente (m)	495,6327139	453,0657675	57,55630789

Tabela E.2: Dados convertidos dos demais usuários

Usuário	10	11	12
Altura registrada pelo GPS (m)	641,30	638,90	635,20
Delta H (m) (Altura da antena acima do GPS)	6,00	3,00	5,00
Nível de Sinal (dBm)	-81,64744	-73,28421	-73,79769
Ângulo θ (rad)	1,6933585	1,6932611	1,6933274
Ângulo ϕ (rad)	5,6574381	5,6573845	5,6573468
Raio total (m)	6.378.647,30	6.378.641,90	6.378.640,20
X_C (m)	5.131.275,2852149	5.131.133,4562223	5.130.950,6743113
Y_C (m)	-3.707.968,1896014	-3.708.284,8783649	-3.708.446,7877026
Z_C (m)	-779.825,1278613	-779.208,0619206	-779.627,0913833
Distância ERB Cliente (m)	679,6890068	489,5813777	71,04606535

Tabela E.3: Dados convertidos dos demais usuários

Usuário	13	14	15
Altura registrada pelo GPS (m)	636,70	637,50	649,10
Delta H (m) (Altura da antena acima do GPS)	6,00	5,00	7,00
Nível de Sinal (dBm)	-78,80571	-81,42276	-79,56654
Ângulo θ (rad)	1,6932614	1,6933024	1,6932495
Ângulo ϕ (rad)	5,6573407	5,6573380	5,6573015
Raio total (m)	6.378.642,70	6.378.642,50	6.378.656,10
X_C (m)	5.130.971,8375615	5.130.935,6912235	5.130.844,6247608
Y_C (m)	-3.708.509,5222656	-3.708.504,6893512	-3.708.724,0405550
Z_C (m)	-779.209,7404930	-779.469,0785367	-779.136,1046954
Distância ERB Cliente (m)	386,9769566	125,5310795	514,5549773

Tabela E.4: Dados convertidos dos demais usuários

Usuário	16	17	18
Altura registrada pelo GPS (m)	634,60	643,20	636,20
Delta H (m) (Altura da antena acima do GPS)	3,00	6,00	6,00
Nível de Sinal (dBm)	-71,9250	-69,4139	-65,86957
Ângulo θ (rad)	1,6933602	1,6933077	1,6932898
Ângulo ϕ (rad)	5,6573142	5,6573323	5,6573193
Raio total (m)	6.378.637,60	6.378.649,20	6.378.642,20
X_C (m)	5.130.806,8552665	5.130.916,6819808	5.130.873,9475659
Y_C (m)	-3.708.597,6532342	-3.708.535,2625288	-3.708.606,3516599
Z_C (m)	-779.834,6571617	-779.503,5765235	-779.389,3624106
Distância ERB Cliente (m)	285,0440448	96,31447322	234,9925193

Tabela E.5: Dados convertidos dos demais usuários

Usuário	19	20
Altura registrada pelo GPS (m)	635,5	646,2
Delta H (m) (Altura da antena acima do GPS)	6,00	7,00
Nível de Sinal (dBm)	-68,92754	-81,87821
Ângulo θ (rad)	1,6932907	1,6933947
Ângulo ϕ (rad)	5,6573249	5,6573820
Raio total (m)	6.378.641,50	6.378.653,20
X_C (m)	5.130.893,6047619	5.130.556,0640285
Y_C (m)	-3.708.576,7661663	-3.708.925,0736648
Z_C (m)	-780.495,2219445	-779.110,8544254
Distância ERB Cliente (m)	214,653515	726,2482182

Tabela E.6: Dados convertidos dos demais usuários

Apêndice F

Perfil do terreno dos enlaces entre as cidades

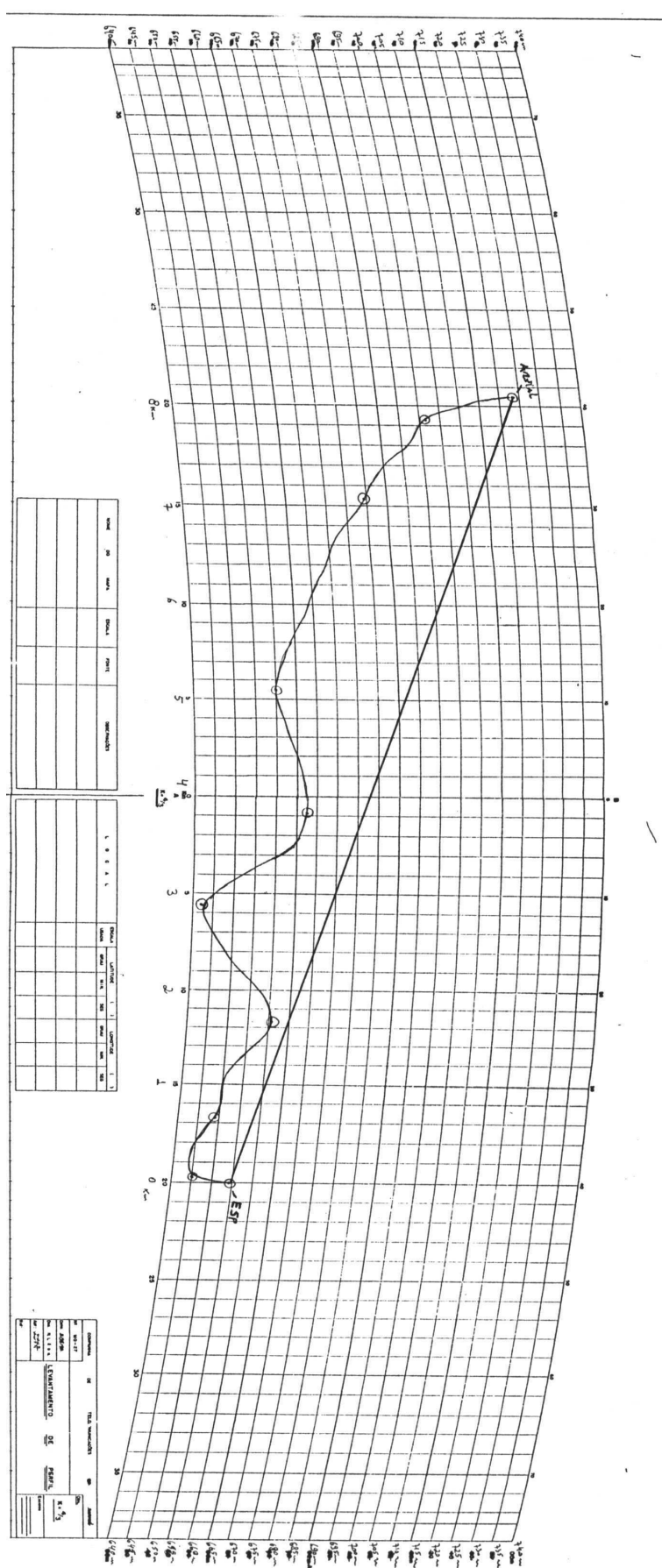


Figura F.1: Perfil do terreno ERB Esperança - ERB Areal

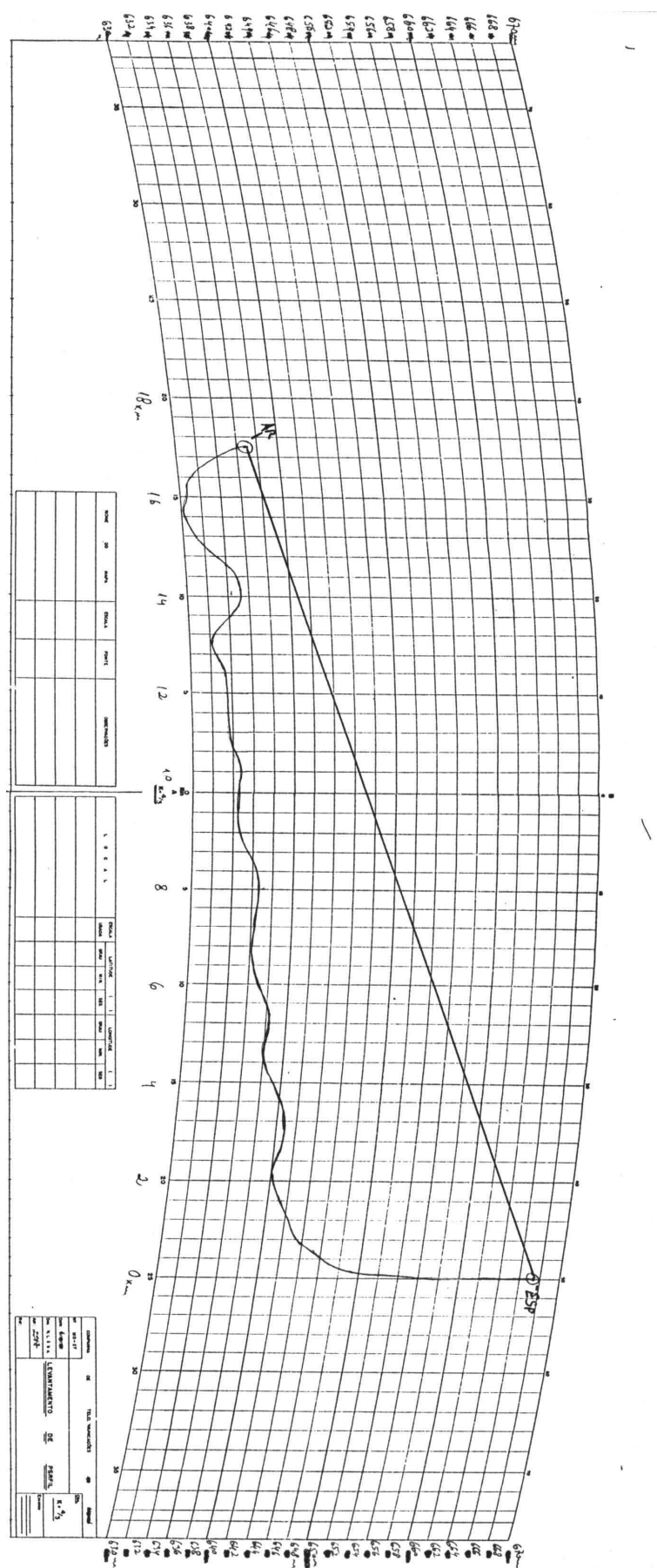


Figura F.2: Perfil do terreno repetidora Esperança - repetidora Areia

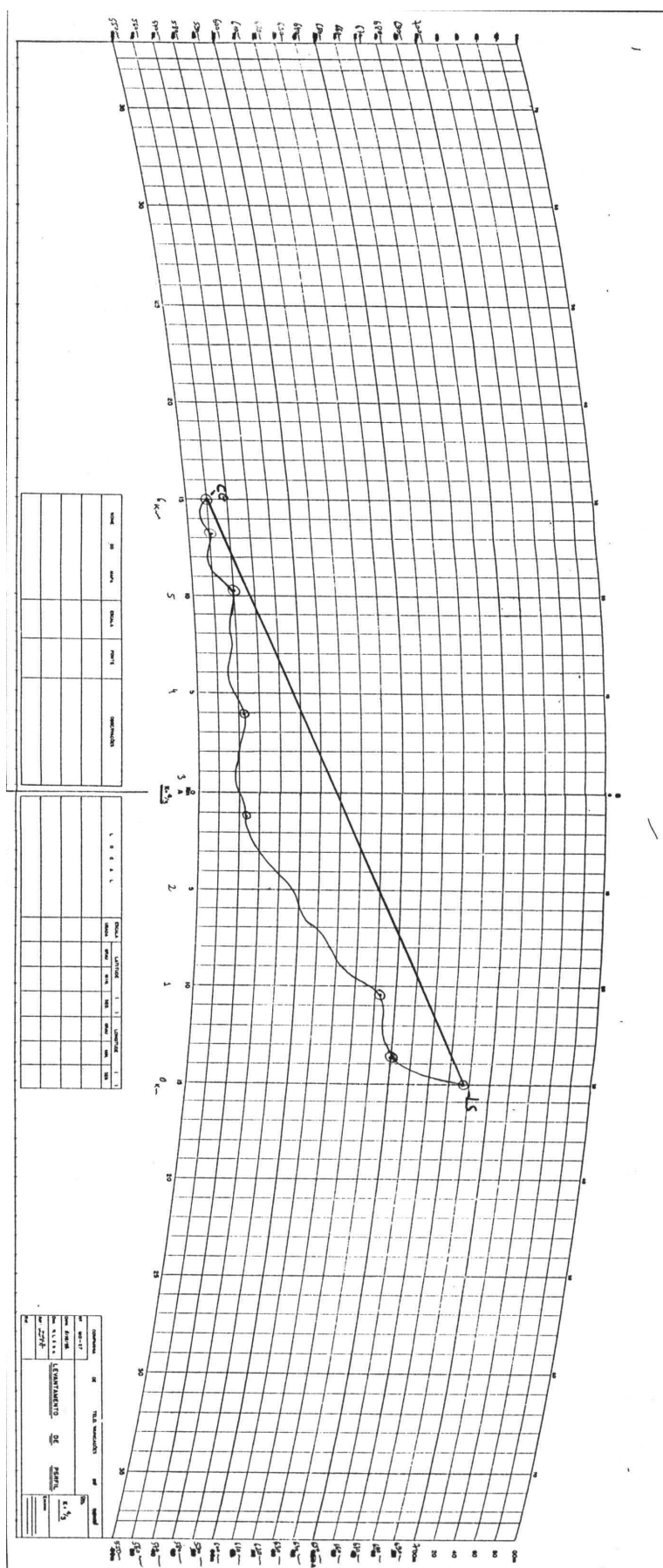
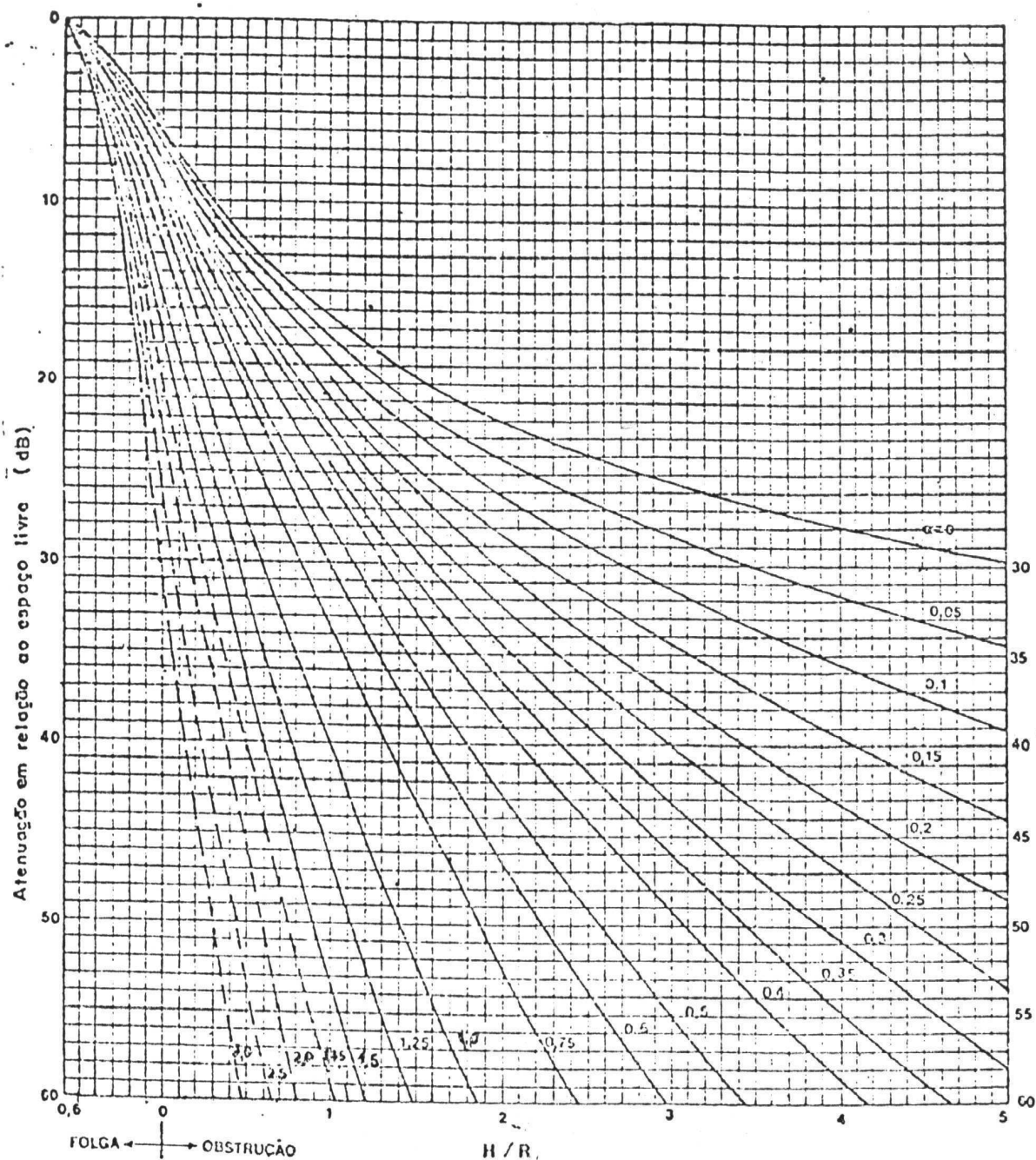


Figura F.3: Perfil do terreno ERB Campina Grande - repetidora Lagoa Seca

Apêndice G

Anexo - Gráfico para obtenção do valor de H/R



DIFRAÇÃO SOBRE OBSTÁCULOS CONVEXOS

Figura G.1: Gráfico para obtenção do valor de H/R em função α

Bibliografia

ADENE. (*antiga SUDENE*). Disponível em <http://www.adene.gov.br>, acessado em janeiro de, 2006. Agência de Desenvolvimento do Nordeste - ADENE.

ALENCAR, M. S. *Probabilidade e Processos Estocásticos - Texto base do curso de processos estocásticos da Pós-Graduação em Engenharia Elétrica*. UFCG - Campina Grande-PB, 2001.

ALENCAR, M. S. de. *Comunicações Móveis Celulares - Apostila do curso de Comunicações Móveis da Pós-Graduação em Engenharia Elétrica*. UFCG - Campina Grande-PB, 1998.

ALENCAR, M. S. de. *Telefonia Digital*. 1ª edição. ed. Brasil: Editora Érica, 1998.

ALENCAR, M. S. de. *Telefonia Celular Digital*. 1ª edição. ed. Brasil: Editora Érica, 2004.

ANATEL. *Agência Nacional de Telecomunicações - ANATEL*. Disponível em <http://www.anatel.gov.br>, acessado em janeiro de, 2006.

ANATEL. *Anexo à RESOLUÇÃO Nº 282 DE 29 DE NOVEMBRO DE 2001*. Disponível em <http://www.anatel.gov.br>, acessado em janeiro de, 2006.

ANATEL. *RESOLUÇÃO Nº 282 DE 29 DE NOVEMBRO DE 2001*. Disponível em <http://www.anatel.gov.br>, acessado em janeiro de, 2006.

BERTONI, H. L. *Radio Propagation for Modern Wireless Systems*. 1ª edição. ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J.: [s.n.], 2000.

BLOMQUIST, A.; LADELL, L. "Prediction and Calculation of Transmisson Loss in Different Types of Terrain". *Nato Agard Conf. Publ. CP-144 Res. Inst. Nat. Defense Dept 3, S.10450, Stockholm*, v. 80, p. 32/1-32/17, 1974.

BRODHAGE, H.; HORMUTH, W. *Planejamento e Cálculo de Radioenlaces*. 2ª edição. ed. São Paulo - SP: Siemens, Editora Pedagógica e Universitária Ltda, 1981.

BRTURBO. *Produto ADSL da operadora Brasil Telecom*. Disponível em <http://www.brturbo.com.br>, acessado em Julho de, 2005.

CAVALCANTE, G. P. S. *Canal de propagação rádio móvel*. UFPA, Bélem-PA: Texto base do Curso da disciplina Propagação da Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 1999.

CHRYSANTHOU, C.; BERTONI, H. "Variability of sector averaged signals for UHF propagation in cities". *IEEE Trans. Vehic. Tech.*, v. 39, p. 352–358, 1990.

CHUNG, H.; BERTONI, H. "Range-dependent path-loss model in residential areas for the VHF and UHF bands". *IEEE Trans. Antenas Propagat.*, v. 50, p. 1–11, 1993.

CISCO. Disponível em <http://www.cisco.com>, acessado em fevereiro de, 2006.

COST. *Urban Transmisson loss models for $m\tilde{\chi}_{\frac{1}{2}}$ ile radio in the 900 and 1800 MHz bands, COST 231 TD (90) 119 Rev. 1*. [S.l.], 1991.

COST231. *COST231- Final Report Document*. Disponível em <http://www.lx.it.pt/cost231/>, acessado em Julho de, 2005.

CROSBY, S. G. D.; HOPPER, A. "The effect of building height variation on the multiple diffraction loss component of the Walfisch-Bertoni model". *LCE, Dept. of Engineering, University of Cambridge*.

D-LINK. Disponível em <http://www.dlink.com>, acessado em novembro de, 2005.

DAPENG, W.; NEGI, R. "Effective Capacity: A Wireless Link Model for Support of Quality of Service". *IEEE Trans. On Wireless Communic.*, v. 2, p. 630–643, July 2003.

DME. Disponível em <http://www.dme.com.br>, acessado em outubro de, 2006.

DODD, A. *O guia essencial para Telecomunicações*. 2ª edição. ed. São Paulo - SP: Editora Campus, 2000.

EDWARDS, R.; DURKIN, J. "Computer Prediction of Service Area for VHF Mobile Radio Networks". *Proc. IEE*, v. 116, n. 9, p. 1943–1500, 1969.

EGLI, J. J. "Radio Propagation Above 40 Mc Over Irregular Terrain". *Proc. IRE*, v. 45, n. 10, p. 1383–1391, 1957.

EMBRATEL. *Operadora de Telefonia Fixa*. Disponível em <http://www.embratel.com.br>, acessado em Julho de, 2005.

FCC. *Federal Communications Commission - FCC*. Disponível em <http://www.fcc.gov>, acessado em novembro de, 2005.

FEBRABAN. *Federação Brasileira de Bancos - Febraban*. http://www.febraban.org.br/Arquivo/destaques/destaque-inovacao_tecnologia.asp, acessado em julho de, 2005.

GARMIN. Disponível em <http://www.garmin.com>, acessado em janeiro de, 2006.

GAST, M. S. *802.11 Wireless Networks - The Definitive Guide*. 2ª edição. ed. United States: [s.n.], 2005.

HATA, M. "empirical formula for propagation loss in land mobile radio services". *IEEE Trans. Veh. Technology*, v. 29, p. 317–325, 1980.

HAYT, W. H. M. *Eletromagnetismo*. 4ª edição. ed. Rio de Janeiro - RJ: LTC - Livros Técnicos Científicos Editora S. A., 1994.

IBGE. *Síntese de Indicadores Sociais 2004*. Rio de Janeiro, 2005. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

IBM. Disponível em <http://www.ibm.com>, acessado em dezembro de, 2005.

IBOPE. *Seção: Notícias, IBOPE Inteligência, NetRatings, Internet Área: Notícias, Press Releases 2005 Data de publicação: 14/07/2005*. <http://www.ibope.com.br>, acessado em Julho de, 2005.

IBRAHIM, M. F.; PARSONS, J. D. "Signal Strength Prediction in Built - up Areas, Part 1; Median Signal Strength". *IEE Proc.*, v. 45, n. 5, p. 130 Part F, 1983.

IEEE. *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications*. IEEE Std 802.11-1999, Part11, 1999.

IEEE. *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Higher-Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band*. IEEE Std 802.11b-1999, Part11, 1999.

IKEGAMI, F.; YOSHIDA, S. "Analysis of Multipath Propagation Structure in Urban Mobile Radio Environments". *IEEE Trans. Antenas Propagat.*, v. 28, p. 531–537, 1980.

IKEGAMI S. YOSHIDA, T. T. F.; UMEHIRA, M. "Propagation Factors Controlling Mean Field Strenght on Urban Streets". *IEEE Trans. Antenas Propagat.*, v. 32, p. 822–829, 1984.

IKEGAMI, T. T. F.; YOSHIDA, S. "Theoretical Prediction of Mean Field Strenght on Urban Mobile Radio". *IEEE Trans. Antenas Propagat.*, v. 39, p. 299–302, 1991.

JAKES, J. W. C. *Microwave Mobile Communications*. New York, USA: John Wiley and Sons, 1974.

KIM, J.; JAMALIPOUR, A. "Traffic Management and QoS Provisioning in Future Wireless IP Networks". *IEEE Personal Communications*, October 2001.

KITAO, K.; ICHITSUBO, S. "Path Loss prediction formula for microcell in 400 MHz to 8 GHz band". *IEEE Electronics Letters*, v. 40, n. 11, 2004.

LEE, J. S.; MILLER, L. E. *CDMA Systems Engineering Handbook*. 1ª edição. ed. Boston - United States: Artech House, 1998.

LEE., W. C. Y. *"Mobile Cellular Telecommunications Systems"*. New York, USA: McGraw-Hill Book Company, 1989.

LSNET. Disponível em <http://www.lsnet.com.br>, acessado em janeiro de, 2006.

MACIEL, H. B. L.; XIA, H. "Unified approach to prediction of propagation over buildings for all ranges of base station antennas height". *IEEE Trans. Vehic. Tech.*, v. 42, p. 41–45, 1993.

NASCIMENTO, J. *Telecomunicações*. 2ª edição. ed. São Paulo - SP: Makron Books, 2000.

NETSTUMBLER. Disponível em <http://stumbler.net>, acessado em dezembro de, 2005.

OKUMURA, Y. "field strength and its variability in uhf and vhf land-mobile radio service". *Rev. Elec. Commun. Lab.*, v. 16, p. 825–873, Sept.-Oct. 1968.

PARSONS, J. D. *The Mobile Radio Propagation Channel*. New York, USA: John Wiley and Sons, 1992.

PIRAMID. *Pyramid Research - Edição Brasil 2004 - Tendências e Cenários Competitivos para o Mercado de Telecom (Brasil e América Latina)*. <http://www.pyramidresearch.com>, acessado em Julho de, 2005.

PROXIM. Disponível em <http://www.proxim.com>, acessado em fevereiro de, 2006.

RFS. Disponível em <http://www.rfsworld.com>, acessado em dezembro de, 2005.

ROHDE. *Rohde and Schwarz*. Disponível em <http://www.rohde-schwarz.com>, acessado em dezembro de, 2005.

SAUNDERS, S.; BONAR, F. "Mobile radio propagation in built-up areas: A numerical model for slow fading". *IEEE Vehicular Technology Symposium*, p. 295–300, 1991.

SPEEDY. *Produto ADSL da operadora Telefônica*. Disponível em <http://www.speedy.com.br>, acessado em Julho de, 2005.

STARONE. *Produto de Acesso a Internet Via Satellite*. Disponível em http://www.starone.com.br/voce/voce_internet_alta_velocidade.php, acessado em Julho de, 2005.

TELEBRAS. *Manual Técnico -Curso de Projeto de Sistema de Rádio da Telebrás - No 225-540-600*. [S.l.], 1982.

TELEMAR. *Operadora de Telefonia Fixa*. Disponível em <http://www.telemar.com.br>, acessado em Julho de, 2005.

VALLE, R. R. M. *Fundamentos de Antenas - Um Curso Introductório*. UFCG, Campina Grande-PB: Apostila da disciplina Antenas e Propagação do Curso de Engenharia Elétrica, 2000.

VELOX. *Produto ADSL da operadora Telemar*. Disponível em <http://www.velox.com.br>, acessado em Julho de, 2005.

VÁSQUEZ, E. J. A. *Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica - Estudo de Cobertura de Sistemas Móveis Celulares em Regiões Urbanas*. PUC - Rio de Janeiro-RJ, 1996.

WALFISCH, J.; BERTONI, H. L. "A theoretical model of UHF propagation in urban environments". *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, v. 36, p. 1788–1796, 1988.

WI-FI. *Wi-Fi International Forum*. Disponível em <http://www.wi-fi.org>, acessado em Julho de, 2005.

XIA, H. H. "A Simplified Analytical Model for Predicting Path Loss in Urban and Suburban Environments". *IEEE Trans. on Vehicular Tech.*, v. 46, p. 1040–1046, 1997.

XIA, H. H.; BERTONI, H. L. "Diffraction of cylindrical and plane waves by an array of absorbing half screens". *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, v. 40, p. 170–177, 1992.

XIA, L. B. H. H.; MACIEL, L. "Radio propagation characteristics for Line-of-Sight Microcellular and Personal Communications". *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, v. 41, p. 1439–1447, 1993.