



**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**MODELO DE PROPAGAÇÃO PARA REDES SEM FIO FIXAS
NA BANDA DE 5,8 GHZ EM CIDADES TÍPICAS DA REGIÃO
AMAZÔNICA**

BRUNO SOUZA LYRA CASTRO

DM – 05/2010

UFPA / ITEC / PPGEE
BELÉM - PARÁ
2010

MODELO DE PROPAGAÇÃO PARA REDES SEM FIO FIXAS NA BANDA DE 5,8 GHZ EM CIDADES TÍPICAS DA REGIÃO AMAZÔNICA

BRUNO SOUZA LYRA CASTRO

Trabalho submetido à Banca Examinadora do programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Telecomunicações

Orientador: Prof. Dr. Gervásio Protásio dos Santos Cavalcante

DM – 05/2010

UFPA / ITEC / PPGEE

BELÉM - PARÁ

2010



**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

MODELO DE PROPAGAÇÃO PARA REDES SEM FIO FIXAS NA BANDA DE 5,8 GHZ EM CIDADES TÍPICAS DA REGIÃO AMAZÔNICA

AUTOR: BRUNO SOUZA LYRA CASTRO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À AVALIAÇÃO DA BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Gervásio Protásio dos Santos Cavalcante - UFPA
Orientador

Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes - UFPA
Membro

Prof. Dr. Hermínio Simões Gomes - UFPA
Membro Externo

Prof. Dr. Adaildo Gomes d'Assunção - UFRN
Membro Externo

Visto:

Prof. Dr. Marcus Vinicius Alves Nunes
Coordenador do PPGEE/ITEC/UFPA

A todos que tornaram possível a realização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Gervásio Protásio dos Santos Cavalcante, pela dedicação e paciência com que me orientou na elaboração desta dissertação;

A toda a minha família pelos ensinamentos e por todo apoio e suporte prestado durante toda a minha vida de estudos;

A Viviane Ferraz Viegas pelo companheirismo imensurável, tanto nas alegrias quanto nos momentos de fraqueza, ajudando a manter meu foco na busca por meus objetivos;

Ao meu parceiro de mestrado Igor Ruiz Gomes que com sua amizade sempre me apoiou colaborando diretamente para a realização deste trabalho;

A Professora Josiane do Couto Rodrigues pelo apoio e ensinamento prestados durante a minha graduação e pós-graduação;

Ao Hermínio Simões Gomes e a Simone da Graça de Castro Fraiha por toda ajuda e conselhos passados a mim;

Ao Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado (LEA) e seus integrantes, pela excelente infraestrutura e ajuda prestada, tornando possível este trabalho;

A Empresa de Processamento de Dados do Estado do Pará (PRODEPA) pelos conhecimentos adquiridos e pelo suporte prestado no desenvolvimento deste trabalho;

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) que com seus ensinamentos contribuíram para a realização deste trabalho;

Ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Comunicações Sem Fio (INCT-CSF) pelo suporte prestado na defesa do meu artigo, contribuindo para a concretização deste trabalho;

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro em forma de bolsa;

A Universidade Federal do Pará, pela oportunidade dada a mim para a realização desta dissertação.

LISTA DE ACRÔNIMOS

COST	<i>European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research</i>
CPE	<i>Costumer Premises Equipment</i>
DP	Desvio Padrão
DVB-H	Digital Video Broadcasting - Handheld
ER	Erro RMS
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
LOS	<i>Line of Sight</i>
MAN	<i>Metropolitan Area Network</i>
NMEA	<i>National Marine Eletronics Association</i>
PRODEPA	Empresa de Processamento de Dados do Estado do Pará
RMS	<i>Root Mean Square</i>
SNMP	<i>Simple Network Management Protocol</i>
SUI	<i>Stanford University Interin</i>
UFPA	Universidade Federal do Pará

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Modelo teórico para reflexão de uma onda de rádio	8
Figura 2.2	Recepção de sinal através do mecanismo de difração	8
Figura 2.3	Princípio de Huygens	9
Figura 2.4	Zonas de Fresnel	10
Figura 2.5	Penetração no Elipsóide de Fresnel	11
Figura 4.1	Vista de um trecho da cidade de Santarém-PA	18
Figura 4.2	Configuração dos equipamentos dentro móvel	19
Figura 4.3	Percurso realizado pela unidade móvel	20
Figura 5.1	Dados relativos às perdas de propagação nas 12 cidades em estudo	28
Figura 5.2	Curva de ajuste aos dados coletados nas 12 cidades em estudo	28
Figura 5.3	Filtragem dos dados coletados nas 12 cidades com base no limite de corte	29
Figura 5.4	Incidência de amostras para diversas distâncias	30
Figura 5.5	Ajuste para dados coletados entre 80 e 180 metros	31
Figura 5.6	Ajuste para dados coletados entre 750 e 850 metros	31
Figura 5.7	Ajuste para dados coletados entre 0,95 e 1,05 quilômetros	32
Figura 5.8	Ajuste para dados coletados entre 1,5 e 1,6 quilômetros	32
Figura 5.9	Ajuste para dados coletados entre 2,4 e 2,5 quilômetros	33
Figura 5.10	Modelo proposto em relação aos dados coletados nas 12 cidades em estudo	35
Figura 5.11	Desempenho dos modelos de propagação em escala linear	35
Figura 5.12	Simulação dos modelos de propagação em escala logarítmica	36
Figura 5.13	Simulação dos modelos de propagação para 250 amostras de medidas realizadas com mobilidade	37
Figura 5.14	Simulação dos modelos de propagação para as cidade de Abaetetuba (a), Altamira (b), Barcarena (c), Itaituba (d), Jacundá (e) e Marabá (f)	38
Figura 5.15	Simulação dos modelos de propagação para as cidades de Pacajá (a), Rurópolis (b), Santarém (c), Tailândia (d), Tucuruí (e) e Uruará (f)	39
Figura 5.16	Erros RMS obtidos pelos modelos de propagação nas 12 cidades	40
Figura 5.17	Desvios padrões obtidos pelos modelos de propagação nas 12 cidades	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Designação das bandas de frequência	4
Tabela 2.2	Designação nominal das bandas de frequência	5
Tabela 3.1	Parâmetros relacionados aos tipos de terrenos	15
Tabela 5.1	Dados coletados para cada intervalo de distância	30
Tabela 5.2	Parâmetros obtidos para cada intervalo de distância	33
Tabela 5.3	Valores obtidos nos parâmetros restantes	34
Tabela 5.4	Desempenho dos Modelos de Propagação para todos os dados coletados nas 12 cidades selecionadas	36
Tabela 5.5	Desempenho dos Modelos de Propagação para medidas em sistemas com mobilidade	37
Tabela 5.6	Desempenho dos Modelos de Propagação para medidas coletadas nas 12 cidades selecionadas	40

RESUMO

O estudo da perda de propagação, nas cidades da região amazônica, envolve um ambiente caracterizado pelo clima tropical e, suburbano densamente arborizado. Levando em consideração a importância da faixa ISM 5,8 GHz, esta dissertação apresenta um modelo de propagação para a faixa de frequência em questão, agregando as características da atenuação experimentada pela onda de rádio quando se propaga em ambientes de cidades típicas da região amazônica. Para tanto, medidas de potência recebida foram coletadas em 335 clientes fixos, distribuídos em 12 cidades na região norte do Brasil, sendo estes atendidos pelo programa de inclusão digital do estado do Pará, NavegaPará. Também foram realizadas medidas com mobilidade no *campus* da Universidade Federal do Pará (UFPA). Apresenta-se ainda o desempenho do modelo proposto sobre outros modelos (Modelo SUI e COST231-Hata) descritos na literatura, para redes sem fio fixas e com mobilidade. As métricas de desempenho utilizadas foram o erro RMS e o desvio padrão com relação aos dados medidos. O ajuste dos parâmetros do modelo proposto é realizado através do método de mínimos quadrados lineares, aplicado em duas etapas para diminuir a incerteza sobre os parâmetros ajustados. O modelo proposto alcançou um erro RMS de 3,8 dB e desvio padrão de 2,3 dB, superando os demais modelos que obtiveram erros RMS acima de 10 dB e desvios padrão acima de 5 dB. Os resultados obtidos mostram a sua eficiência sobre outros modelos para predição de perdas na faixa de 5,8 GHz em sistemas fixos e móveis.

Palavras-chaves: Redes sem fio fixas, região amazônica, mínimos quadrados lineares, modelo de propagação.

ABSTRACT

The study of propagation loss in the Amazon region cities involves an environment characterized by tropical climate and suburban environments densely arboreous. Based in the importance of ISM band 5.8 GHz, this work presents a propagation model for this frequency band, combining the characteristics of attenuation experienced by a radio wave when it propagates in typical environments found in Amazon region cities. For such purpose, measurements of the received power were carried out in 335 fixed customers distributed in 12 towns in northern Brazil, which are served by digital inclusion program in the state of Pará, NavegaPará. Measurements with mobility were also carried out on the Federal University of Pará (UFPA) area. Still, it is presented the performance of the proposed model over other models (SUI model and COST231-Hata), described in the literature, when in fixed and mobile networks. Performance metrics such as RMS error and standard deviation were applied taking as reference the measured data. Tuning procedure of the model parameters is performed by the method of linear least squares, applied in two steps to reduce uncertainty about the parameters set. The proposed model achieved an RMS error of 3.8 dB and standard deviation of 2.3 dB, surpassing all other models that had RMS errors above 10 dB and standard deviations over 5 dB. The results show its efficiency on other models to predict losses in the range of 5.8 GHz in stationary and mobile systems.

Keywords: Fixed wireless network, amazon region, linear least squares, propagation model.

SUMÁRIO

LISTA DE ACRÔNICOS	Vii
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	Ix
RESUMO	X
ABSTRACT	Xi
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 - MOTIVAÇÃO	1
1.2 - ESTADO DA ARTE	2
1.3 - OBJETIVOS	2
1.4 - CONTRIBUIÇÕES	3
1.5 - ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	3
CAPÍTULO 2 - PROPAGAÇÃO DE SINAIS E EFEITO DE CANAL	4
2.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS	4
2.2 - FAIXAS DE FREQUÊNCIAS DAS ONDAS DE RÁDIO	4
2.3 - RÁDIO PROPAGAÇÃO	5
2.3.1 - Propagação no Espaço Livre	6
2.3.2 - Reflexão	7
2.3.3 - Difração	8
2.3.3.1 - Zona de Fresnel e Perda por Difração de Gume de Faca	9
2.4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	11
CAPÍTULO 3 - MODELOS DE PROPAGAÇÃO	12
3.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS	12
3.2 - IMPORTÂNCIA DOS MODELOS DE PROPAGAÇÃO	12
3.2.1 - Modelos Teóricos	12
3.2.2 - Modelos Empíricos	13
3.2.2.1 - Modelo Okumura-Hata	13
3.2.2.2 - Modelo COST231-Hata	14
3.2.2.3 - Modelo IEEE 802.16 (Modelo SUI)	15
3.3 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	16
CAPÍTULO 4 - METODOLOGIA E MODELO PROPOSTO	17
4.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS	17
4.2 - COLETA DE DADOS	17
4.2.1 - Tratamento dos Dados	18
4.2.2 - Medições no <i>Campus</i> Universitário	19
4.3 - PROPOSTA DO MODELO DE PROPAGAÇÃO	21
4.3.1 - Modelo de Propagação para 5,8 GHz	21
4.4 - AJUSTE COM MÍNIMOS QUADRADOS LINEARES	22
4.4.1 - Ajuste do Modelo de Propagação Proposto	24
4.4.1.1 - Primeira Etapa	25
4.4.1.2 - Segunda Etapa	25
4.5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	26
CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E ANÁLISE	27
5.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS	27
5.2 - APLICAÇÃO DO AJUSTE AOS DADOS COLETADOS	27
5.2.1 - Filtragem de <i>Outliers</i>	27
5.2.2 - Ajuste do Parâmetro K_0	29
5.2.3 - Ajuste dos Demais Parâmetros	33

5.3 - AVALIAÇÃO DO MODELO PROPOSTO	34
5.3.1 - Procedimentos de Avaliação	34
5.3.1.1 - Avaliação em Sistemas Fixos	34
5.3.1.2 - Avaliação em Sistemas Móveis	36
5.3.1.3 - Avaliação de Predição de Perdas em Cada Cidade	37
5.4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	41
CONCLUSÃO	43
REFERÊNCIAS	44

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Os sistemas de comunicação *wireless* (sem fio) estão em constante evolução no que diz respeito à capacidade de trafegar maiores volumes de dados e conseqüentemente, ao suporte de uma maior variedade de serviços. Em face disso, a preferência pela implantação de tais sistemas também vem crescendo e este fato desencadeia uma série de medidas necessárias, sendo estas, diretamente relacionadas com a busca por uma maior eficiência em seu planejamento.

O estágio inicial em projetos para a implantação de sistemas *wireless*, com base no conceito celular [1], é a estimativa de sua área de cobertura, ou seja, o raio de sua célula. Para tanto, são descritos na literatura diversas equações matemáticas que predizem a perda de propagação, variável esta, usada no dimensionamento de redes *wireless*. Na grande maioria dos casos, existem softwares que empregam estas equações para a realização de projetos.

Para o caso de cidades típicas da região amazônica, os modelos de propagação existentes nem sempre apresentam bons resultados quando aplicados neste ambiente. Tal comportamento pode ser fundamentado no fato dos diversos modelos de propagação existentes terem sido derivados de campanhas de medição realizadas em locais cujas características, não se enquadram no padrão visto em cidades da região amazônica.

A incerteza quanto à eficiência dos modelos é um problema comum, sendo este, o responsável pelo surgimento de pesquisas que buscam adequar os modelos de propagação visando à obtenção de um melhor desempenho em outros ambientes. As metodologias usadas em ajustes de modelos abrangem diversas etapas como, por exemplo: coleta de dados através de campanhas de medição, tratamento dos dados, rotinas de ajuste do modelo aos dados coletados, entre outras.

1.1 - MOTIVAÇÃO

Dentro da literatura se tem pouco conhecimento, até então, da existência de modelos de propagação para predição de ondas de rádio em frequências na faixa ISM 5,8 GHz, voltados para o ambiente encontrado nas cidades da região amazônica. É importante

frisar que esta faixa de frequência é largamente utilizada em diversos sistemas wireless banda larga, sendo também, parte integrante do grupo de frequências utilizadas no padrão IEEE 802.16 [2]. Pelo fato de ser não-licenciada, a faixa de 5,8 GHz é muito utilizada na implantação de diversas redes banda larga, sendo peça fundamental nos programas de inclusão digital, a exemplo do que é mostrado em [3].

Visto a importância da utilização desta faixa de frequência, a busca pela eficiência na predição de seu comportamento é fundamental, e esta, pode ser alcançada com a utilização de um modelo que melhor represente as perdas de propagação nos ambientes encontrados em cidades da região amazônica.

1.2 - ESTADO DA ARTE

Dentro literatura, a modelagem empírica de perdas de propagação possui diversas contribuições. Grande parte dos trabalhos encontrados levam em consideração um ambiente diferente do abordado neste trabalho, porém, são baseadas em metodologias e técnicas de otimização semelhantes.

Os trabalhos apresentados em [4] e [5] mostram a utilização de mínimos quadrados lineares para ajuste de modelo de propagação. Ambos os trabalhos foram realizados em cidades chinesas, com dados coletados de redes 3G (Terceira Geração). Em um dos trabalhos a diminuição do erro médio de predição chegou até 14 dB.

A dissertação de mestrado apresentada em [6] descreve a utilização de mínimos quadrados para ajustes no Modelo Xia-Bertoni, realizando a comparação do mesmo com os modelos COST231 e Okumura-Hata. O trabalho explora a problemática no planejamento de cobertura de rádio digital DVB-H. Os dados coletados foram obtidos de cidades localizadas na Alemanha, Suécia, Espanha e Colômbia. Com base nos resultados globais, o modelo ajustado obteve uma redução do erro médio em torno de 15 dB e, o desvio padrão teve redução significativa de aproximadamente 4 dB.

1.3 - OBJETIVOS

Este trabalho se propõe a elaborar um modelo de propagação de fácil implementação, adequado para predição de perdas de propagação na faixa ISM 5,8 GHz, onde o mesmo é derivado de medidas coletadas em 12 cidades situadas na região Norte do

Brasil. Os dados coletados nesta região buscam a caracterização da propagação de ondas de rádio, na faixa de frequência em estudo, para ambientes suburbanos arborizados, tipicamente descritos por enlaces com linhas de visada clara ou parcialmente obstruída.

A determinação dos parâmetros do modelo proposto é baseada no uso de mínimos quadrados lineares, entretanto, este trabalho propõe uma metodologia de ajuste baseada em etapas, objetivando assim o controle do grau de importância dos termos que compõem a equação do modelo de propagação proposto.

1.4 - CONTRIBUIÇÕES

Como principais contribuições desta dissertação, destacam-se:

- Obtenção de um modelo empírico capaz de prever as perdas de propagação em ambientes característicos presentes nas cidades da região amazônica na faixa ISM 5.8 GHz.
- Metodologia eficiente de ajuste do modelo de propagação buscando um melhor desempenho quando comparado com outros modelos da literatura.
- Criação de um *setup* de medição de fácil implementação para aquisição de dados georeferenciados.

1.5 - ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está dividida em 5 capítulos cuja organização é mostrada a seguir:

- No capítulo 2, serão revisados os conceitos sobre propagação de ondas de rádio
- No capítulo 3, haverá uma abordagem acerca de modelos de propagação com citações de modelos conhecidos na literatura.
- No capítulo 4, será descrita a metodologia utilizada para a aquisição de dados, havendo também, a descrição do modelo proposto e as etapas de ajuste do mesmo.
- No capítulo 5, serão apresentados os resultados obtidos a partir da metodologia empregada, havendo também uma análise comparativa com os modelos descritos na literatura em relação ao desempenho na previsão de perdas de propagação.

CAPÍTULO 2 - RÁDIO PROPAGAÇÃO E EFEITOS DO CANAL

2.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Em sistemas de comunicação sem fio, a principal limitação existente é a decorrente das condições impostas pelo canal de propagação, desta forma, se faz necessário o entendimento das influências sofridas pelo sinal no trajeto percorrido entre transmissor e receptor.

A grande questão está relacionada com as condições impostas pelo ambiente em que as ondas de rádio se propagam, afinal, há uma variação em seu comportamento de acordo com a faixa de frequência utilizada para a transmissão de sinais. Antes de explorar os mecanismos e efeitos envolvidos neste processo, é preciso conhecer as faixas de frequências que foram designadas para uso nos diversos sistemas de comunicações.

2.2 - FAIXAS DE FREQUÊNCIAS DAS ONDAS DE RÁDIO

Durante a segunda guerra mundial, siglas foram usadas para designar faixas de frequências, em especial, as utilizadas pelos sistemas de radares. A Tabela 2.1 mostra as designações utilizadas.

Tabela 2.1 - Designação das bandas de frequência

Banda	Designação	Faixa de Frequência
Frequência extremamente baixa	ELF	< 3 kHz
Frequência muito baixa	VLF	3 – 30 kHz
Frequência baixa	LF	30 – 300 kHz
Frequência média	MF	300 kHz – 3 MHz
Frequência alta	HF	3 – 30 MHz
Frequência muito alta	VHF	30 – 300 MHz
Frequência ultra alta	UHF	300 MHz – 3 GHz
Frequência super alta	SHF	3 – 30 GHz
Frequência extremamente alta	EHF	30 – 300 GHz

Com base em um consentimento internacional e, através da União Internacional de Telecomunicações (ITU), foram estabelecidas as seguintes faixas nominais de frequências, mostradas na Tabela 2.2:

Tabela 2.2 - Designação nominal das bandas de frequência

Banda	Faixa de Frequência Nominal
HF	3 – 30 MHz
VHF	30 – 300 MHz
UHF	300 – 1000 MHz
L	1 – 2 GHz
S	2 – 4 GHz
C	4 – 8 GHz
X	8 – 12 GHz
Ku	12 – 18 GHz
K	18 – 27 GHz
Ka	27 – 40 GHz
R	26.5 – 40 GHz
Q	33 – 50 GHz
V	40 – 75 GHz
W	75 – 110 GHz

No decorrer dos anos, em função de demandas por novos e diferentes serviços de comunicação, as bandas que se tornaram mais utilizadas foram as de frequências muito altas (VHF), frequências ultra altas (UHF) e as frequências super altas (SHF). Nesta dissertação, o modelo proposto é ajustado para uso na faixa ISM (Industrial, Scientific and Medical) 5,8 GHz, presente na faixa SHF.

2.3 - RÁDIO PROPAGAÇÃO

A propagação de ondas de rádio é um fenômeno que vem sendo estudado por décadas. Deve-se ter em mente que durante o trajeto percorrido por uma onda entre um transmissor e um receptor, a mesma estará sujeita a diversos fenômenos inerentes à natureza dos mecanismos de propagação. Basicamente, uma onda de rádio propagante em um meio pode sofrer efeitos de reflexão, difração e espalhamento [1]. Antes de fazer uma

abordagem a respeito dos fenômenos envolvidos na propagação, será explanada, primeiramente, a propagação no espaço livre.

2.3.1 - Propagação no Espaço Livre

Uma onda de rádio é dita propagada no espaço livre quando o percurso experimentado pela mesma, entre transmissão e recepção, é caracterizado por uma clara linha de visada (*line of sight* – LOS), ou seja, um trajeto limpo e desobstruído. Em teoria, o termo espaço livre indica o vácuo, porém, este termo pode ser aplicado, em nível de projeto ou estudo, na caracterização da propagação de ondas de rádio em meios desobstruídos, desde que estes caracterizem as condições que indicam por completo um enlace de rádio frequência em LOS.

Em projetos de redes banda larga sem fio, por exemplo, pode-se considerar a propagação em espaço livre para a realização de uma estimativa inicial de cobertura do sinal propagado. O cálculo da potência recebida em uma determinada distância é baseado em perdas de propagação no espaço livre, e estas, podem ser obtidas utilizando-se o modelo de propagação descrito pela equação do espaço livre de Friis [1]:

$$P_R(d) = \frac{P_T G_T G_R \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \quad (2.1)$$

Onde:

$P_R(d)$ - Potência recebida em função da distância d , em Watts

P_T - Potência de transmissão, em Watts

G_T & G_R - Ganhos de transmissão e recepção, em metros

λ - Comprimento de onda, em metros

d - Distância entre transmissor e receptor, em metros

L - Fator de perdas, $L \geq 1$

A partir da equação (2.1), pode-se encontrar a perda do espaço livre ou, a atenuação sofrida pelo sinal no percurso entre transmissor e receptor, dada pela razão entre potência transmitida e potência recebida [7]:

$$\text{Perda no espaço Livre} = L = \frac{P_T}{P_R} = G_T G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (2.2)$$

Apesar da perda no espaço livre ser obtida através da equação (2.2), na prática, grande parte dos cálculos realizados em projetos de cobertura utilizam fórmulas e valores em escala logarítmica. Sendo assim, a perda no espaço livre para um sinal com frequência de transmissão na faixa MHz (Megahertz) em uma distância de separação d (quilômetros) entre transmissor e receptor, é dada pela equação abaixo em unidade decibel (dB):

$$L = 32,44 - 10 \log(G_T) - 10 \log(G_R) + 20 \log(f) + 20 \log(d) \quad \text{dB} \quad (2.3)$$

Da equação (2.3), tem-se o operador “log” que neste trabalho, será a referência para o logaritmo na base 10.

2.3.2 - Reflexão

No item anterior foi vista a forma mais trivial de propagação, caracterizada como propagação no espaço livre. Agora, será abordado um dos três mecanismos básicos de propagação de ondas de rádio, a reflexão.

A reflexão é um dos mais significantes mecanismos de propagação existentes em sistemas fixos com redes sem fio. As ondas de rádio são refletidas quando incididas em objetos com grandes dimensões se comparados ao comprimento de onda do sinal que se propaga. Situações típicas onde este fenômeno ocorre podem ser verificadas em ondas que incidem, por exemplo, na superfície da Terra, em prédios e paredes [1].

Quando uma onda de rádio propagada em um meio incide sobre outro meio com diferentes propriedades elétricas, a mesma é parcialmente refletida e parcialmente transmitida, ou seja, uma parte da energia contida na onda é devolvida ao meio de origem, e a outra, é transmitida ao novo meio, como mostra na figura 2.1.

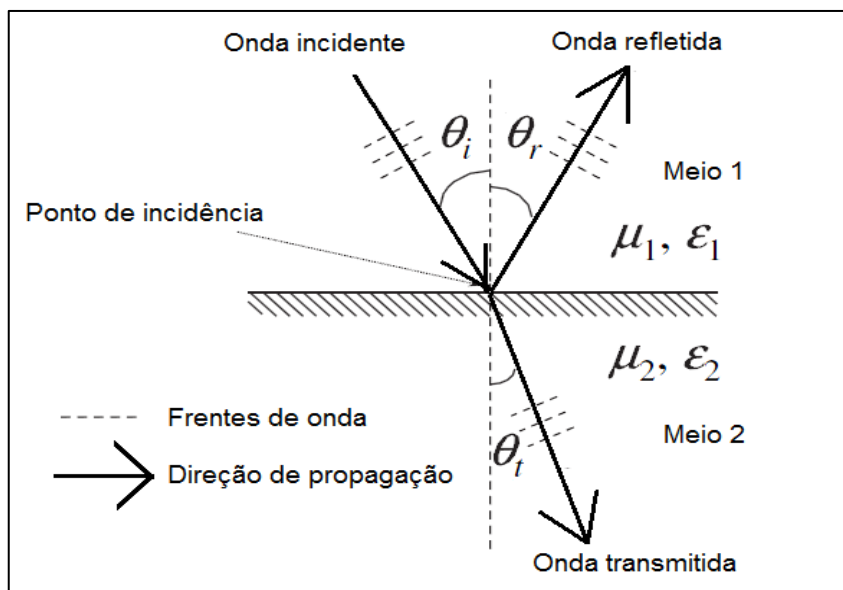


Figura 2.1 - Modelo teórico para reflexão de uma onda de rádio

2.3.3 - Difração

A difração é um fenômeno que ocorre com qualquer onda propagante, inclusive, com as ondas de rádio usadas em sistemas de comunicação sem fio. Este mecanismo permite que um receptor possa receber uma quantidade, às vezes útil, da energia do sinal transmitido, mesmo em presença de uma grande obstrução. A figura abaixo mostra um exemplo de recepção de sinal através de difração:

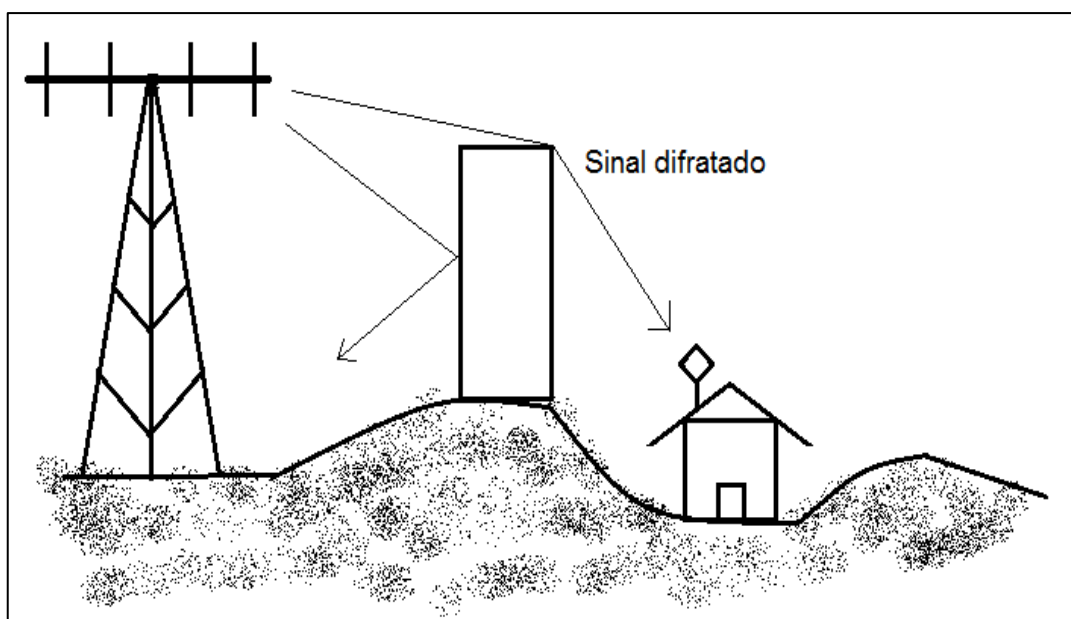


Figura 2.2 - Recepção de sinal através do mecanismo de difração

O fenômeno da difração pode ser explicado pelo Princípio de Huygens, que estabelece que todos os pontos de uma frente de onda podem ser considerados como fontes que produzirão pequenas ondas secundárias, e estas, quando combinadas, resultam em uma nova frente de onda [1]. A figura abaixo exemplifica a teoria envolvida no Princípio de Huygens.

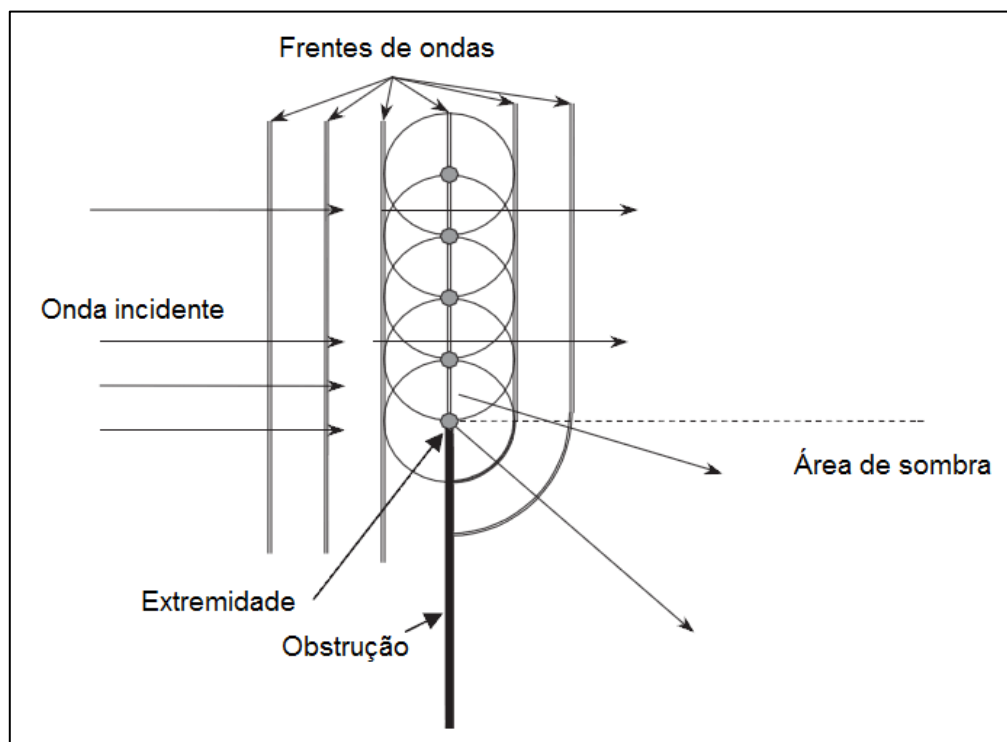


Figura 2.3 - Princípio de Huygens [8]

2.3.3.1 - Zona de Fresnel e Perda por Difração de Gume de Faca

Em sistemas fixos de comunicação sem fio, a condição ideal a ser obtida é o estabelecimento da linha de visada (LOS) no trajeto percorrido pelo sinal transmitido até um receptor. Na prática, nem sempre esta condição pode ser alcançada, pois em diversas situações, a linha de visada se encontra obstruída por prédios, vegetações e elevações de terreno.

O grau de obstrução de uma linha de visada pode ser avaliado empiricamente, através de observações, porém, existe uma maneira de calcular possíveis perdas em um enlace de rádio em função das obstruções. Entretanto, é preciso compreender um parâmetro muito importante na avaliação de enlaces de rádio, chamado Zona de Fresnel.

A Zona de Fresnel é uma representação para sucessivas regiões (elipsóides) compostas por ondas secundárias que possuem um percurso entre transmissor e receptor $n \lambda/2$ maior que o percurso em LOS, onde n representa a n -ésima zona de Fresnel. Como o mostrado na figura a seguir:

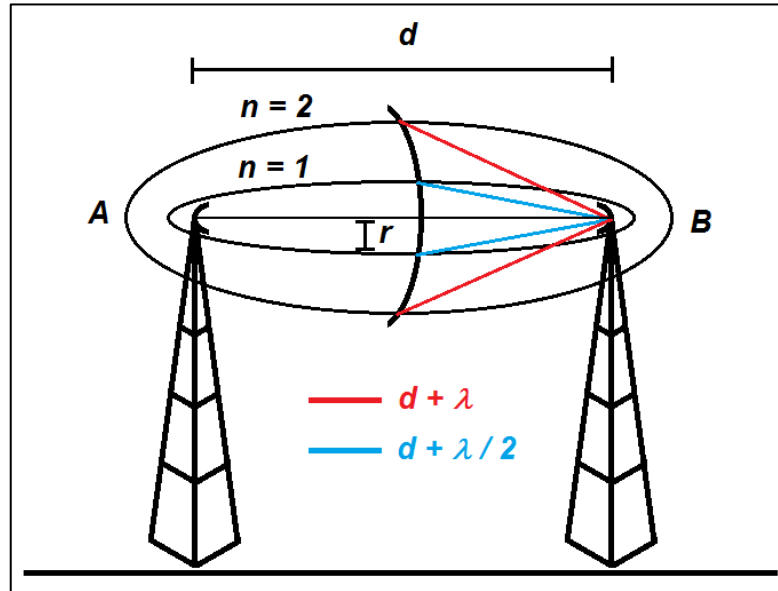


Figura 2.4 – Zonas de Fresnel

Para a realização de projetos, apenas a primeira Zonal de Fresnel ($n=1$) pode ser considerada em virtude de a mesma possuir grande parte da energia do sinal transmitido. O raio do elipsóide na n -ésima Zona de Fresnel é obtido com o uso da equação abaixo:

$$r_n = \sqrt{\frac{n\lambda d_1 d_2}{d_1 d_2}} \quad (2.4)$$

Onde:

d_1 - Distância entre o ponto A e ponto onde se deseja o raio r , em metros

d_2 - Distância entre o ponto B e ponto onde se deseja o raio r , em metros

λ - Comprimento de onda, em metros

Ao se utilizar a primeira zona de Fresnel no dimensionamento de um enlace de rádio, pode ser feito o cálculo de possíveis perdas por difração baseadas no grau de penetração do relevo no elipsóide da zona de Fresnel. A figura 2.5 ilustra a situação:

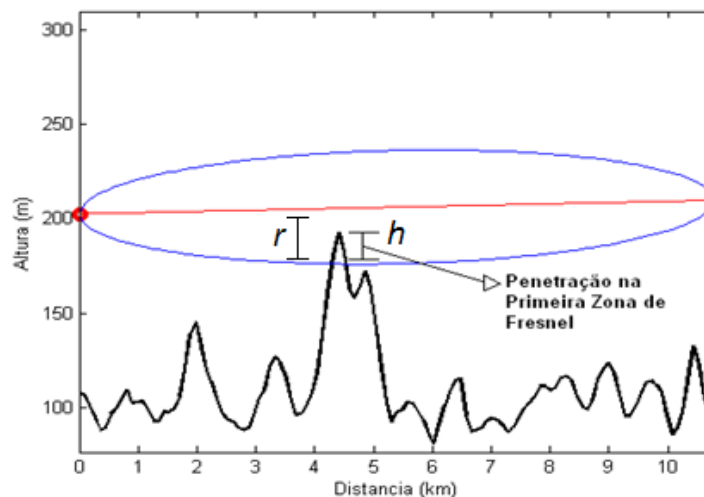


Figura 2.5 - Penetração no elipsóide de Fresnel

A perda decorrente da penetração do relevo é calculada a partir do grau de liberação da Zona de Fresnel [8];

$$v = \frac{h}{r_n} \sqrt{2n} \quad (2.5)$$

Onde:

v - Parâmetro de difração

h - Altura efetiva da obstrução, em metros

r_n - Raio do n -ésimo elipsóide de Fresnel, em metros

Mais detalhes sobre como se utilizar o parâmetro v para o cálculo da perda em função da difração por gume de faca são encontrados em [1].

2.4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram vistas as classificações das diversas faixas de frequências designadas pela ITU. A propagação de ondas de rádio também foi abordada, mostrando-se os principais fenômenos envolvidos no percurso realizado entre transmissor e receptor. Perdas de propagação experimentadas por ondas propagantes são descritas por Modelos de Propagação, que, serão tratados no próximo capítulo.

CAPÍTULO 3 - MODELOS DE PROPAGAÇÃO

3.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O planejamento de sistemas de comunicação baseados em redes banda larga sem fio requer uma metodologia de projeto semelhante à utilizada em sistemas celulares, baseada na necessidade de se estimar o raio de cobertura em uma célula através das características do servidor (transmissor), do cliente (receptor), e do ambiente (percurso). Para estas situações, a predição da área de cobertura é feita através de modelos matemáticos que descrevem a atenuação do sinal (perda de percurso) para uma determinada distância de separação entre o transmissor e receptor. Estes modelos matemáticos são chamados de Modelos de Propagação.

3.2 - IMPORTÂNCIA DOS MODELOS DE PROPAGAÇÃO

Modelos de propagação realizam a predição de perdas com base na utilização de diversos parâmetros relacionados ao ambiente onde o sinal se propaga. Podem ser levados em conta, por exemplo, a presença de árvores, prédios, e outros obstáculos considerados candidatos potencialmente influentes na atenuação do sinal em uma determinada faixa de frequência. Apesar de serem encontradas na literatura diversas classificações para a variedade de modelos de propagação existentes, os mesmos podem ser divididos em dois grandes grupos: Modelos Teóricos e Empíricos.

3.2.1 - Modelos Teóricos

Modelos de propagação teóricos, como o próprio nome indica, são modelos baseados em formulações teóricas, fundamentadas em suposições originadas de dados coletados em medições, ou, em leis físicas. Alguns tipos de modelos teóricos não se tornam viáveis para o planejamento de redes sem fio por não levarem em consideração as características específicas do ambiente em estudo. Outros tipos de modelos se baseiam na aquisição de bases de dados que descrevem detalhadamente as características do meio, e, na teoria de propagação de ondas eletromagnéticas, como é o caso da técnica *Ray-Tracing* [9]. Porém, isto não é tão vantajoso, em nível de projeto, tendo em vista que os modelos que descrevem detalhadamente as características de propagação do meio exigem grande

esforço computacional e representam apenas as características de propagação de um local específico (*site-specific*).

3.2.2 - Modelos Empíricos

Modelos de propagação empíricos são baseados na realização de diversas medições e observações em ambientes reais de propagação. A equação que rege um modelo empírico é criada de tal maneira para se ajustar da melhor forma possível aos dados medidos. Para que um modelo empírico possa representar com eficiência as perdas de propagação em um determinado ambiente, o mesmo deve ter seus parâmetros derivados de características do local estudado, vinculados com a frequência de operação do sistema e alturas efetivas das antenas utilizadas para transmissão e recepção de sinais [8]. A seguir, serão abordados alguns dos mais conhecidos modelos existentes na literatura, sendo que, alguns farão parte de uma análise de desempenho comparativa em relação ao modelo gerado neste trabalho.

3.2.2.1 - Modelo Okumura-Hata

O modelo Okumura-Hata é muito conhecido e utilizado em planejamentos de redes celulares, sendo umas das principais referências para projetos nesta área. Este modelo foi gerado a partir de gráficos com informações de perdas de percurso obtidos por Okumura em diversas medições na cidade de Tóquio, nas faixas entre 150 MHz e 1500 MHz. Este modelo é válido para estações base (transmissor) com alturas efetivas entre 30 m e 200 m e para alturas de cliente (receptor) entre 1m e 10 m.

A perda de propagação em unidade dB para áreas urbanas é expressa pela seguinte equação:

$$L_U = 69,55 + 26,26 \log(f) - 13,82 \log(h_{te}) - a(h_{re}) + (44,9 - 6,55 \log(h_{te})) \log(d) \quad (3.1)$$

Onde:

f - Frequência de operação, em MHz

h_{te} - Altura de transmissão, em metros

h_{re} - Altura de recepção, em metros

$a(h_{re})$ - fator de correção para altura da antena em função do tipo de área, dB

De acordo com os ajustes feitos por Hata, este modelo pode ser aplicado para áreas urbanas e rurais utilizando as variações do termo $a(h_{re})$ e os ajustes mostrados nas equações (3.2), (3.3) e (3.4):

$$\text{Cidades pequenas e médias } a(h_{te}) = (1,1 \log(f) - 0,7)h_{te} - (1,56 \log(f) - 0,8) \quad (3.2)$$

$$\text{Cidades Grandes } a(h_{re}) = 8,29(\log(1,54h_{re}))^2 - 1,1, f < 300\text{MHz} \quad (3.3)$$

$$a(h_{re}) = 3,2(\log(11,75h_{re}))^2 - 4,97, f \geq 300\text{Mz} \quad (3.4)$$

Para se calcular a perda total de percurso em uma área suburbana usa-se a seguinte equação:

$$L = L_U - 2(\log(f/28))^2 - 5,4 \quad (3.5)$$

A perda total para áreas rurais é encontrada utilizando-se a equação abaixo:

$$L = L_U - 4,78(\log(f))^2 + 18,33 \log(f) - 40,94 \quad (3.6)$$

3.2.2.2 - Modelo COST 231-Hata

Este modelo é uma extensão do modelo Okumura-Hata, feito para abranger as bandas de frequência entre 1500 MHz e 2000 MHz. A perda de propagação para este modelo é dada pela equação abaixo:

$$L = 46,3 + 39,9 \log(f) - 13,82 \log(h_{te}) - a(h_{re}) + \\ (44,9 - 6,55 \log(h_{te})) \log(d) + C_m \quad (3.7)$$

Onde:

$C_m = 0$ dB para áreas urbanas médias e suburbanas

$C_m = 3$ dB para centros urbanos

3.2.2.3 - Modelo IEEE 802.16 (Modelo SUI)

O grupo de trabalho 802.16 do IEEE vem desenvolvendo padrões em sistemas banda larga. Para os padrões operantes em frequências abaixo de 11 GHz, este grupo de trabalho criou modelos de canal, conhecidos também como Modelos SUI (Stanford University Interim), pelo fato de haver a participação da Universidade de Stanford em seu desenvolvimento [7]. A perda de propagação para ambientes suburbanos é calculada pelas seguintes equações e valores tabelados [10], mostrados a seguir:

$$L_{SUI} = A + 10\gamma \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + S, d > d_0 \quad (3.8)$$

$$A = 20 \log\left(\frac{4\pi d_0}{\lambda}\right) \quad (3.9)$$

$$\gamma = a - bh_b + \frac{c}{h_b} \quad (3.10)$$

Onde:

d - Distância, em metros

d_0 - Distância inicial, $d_0 = 100$ metros

λ - Comprimento de onda, em metros

γ - Expoente de perdas

h_b - Altura da estação base, $10 \leq h_b \leq 80$ metros

Os parâmetros a , b e c assumem valores que variam de acordo com o tipo de terreno [11], de acordo com a tabela 3.1:

Tabela 3.1 - Parâmetros relacionados aos tipos de terreno

Parâmetro do Modelo	Terreno tipo A	Terreno tipo B	Terreno tipo C
a	4,6	4	3,6
b	0,0075	0,0065	0,005
c	12,6	17,1	20

A variável S na equação (3.8) caracteriza o desvanecimento lento do sinal (shadowing). Normalmente os valores do desvio padrão de S estão entre 8,2 e 10,6 dB, dependendo da morfologia do terreno ou vegetação [11].

O modelo apresentado tem validade para frequências próximas de 2 GHz e alturas de recepção até 2 m. Para se utilizar o modelo descrito em outras frequências e alturas de recepção entre 2 m e 10 m, é necessário usar a equação do modelo de propagação acrescido de fatores de correção:

$$L = L_{SUI} + \Delta PL_f + \Delta PL_h \quad (3.11)$$

$$\Delta PL_f = 6 \log(f/2000) \quad (3.12)$$

$$\Delta PL_h = -10,8 \log(h/2), \text{ terrenos A e B} \quad (3.13)$$

$$\Delta PL_h = -20 \log(h/2), \text{ terreno C} \quad (3.14)$$

Onde:

ΔPL_f - Fator de correção de frequência, em dB

ΔPL_h - Fator de correção para altura de recepção, em dB

h - Altura de recepção, em metros

3.3 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram citados modelos de propagação presentes na literatura, onde, os modelos SUI e COST231-Hata serão utilizados durante a análise comparativa com o desempenho do modelo proposto nesta dissertação.

O foco deste trabalho é voltado para predição de perdas com modelos empíricos, pois, estes são muito empregados em projetos devido a fácil sua implementação e boa representatividade das características do ambiente. O próximo capítulo desta dissertação irá tratar sobre a técnica adotada para ajuste do modelo proposto bem como a metodologia utilizada para aquisição de dados (perda de propagação).

CAPÍTULO 4 - METODOLOGIA E MODELO PROPOSTO

4.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Todos os modelos de propagação apresentados no capítulo anterior foram obtidos de dados coletados em campanhas de medição. Em grande parte dos casos, as medições são realizadas em uma unidade móvel equipada com CPEs (Customer Premises Equipment), sendo estes, os rádios clientes utilizados na recepção de sinais em uma determinada faixa de frequência. A unidade móvel utilizada em uma campanha de medição normalmente possui um GPS (Global Positioning System) para georeferenciar os dados coletados, desta forma, podem ser obtidas as distâncias entre os pontos coletados e a estação base, geradora do sinal.

4.2 - COLETA DE DADOS

Neste trabalho, os dados referentes à potência recebida em determinada distância, foram tomados de clientes instalados em 12 cidades situadas na região norte do Brasil, as mesmas são integrantes de um programa de inclusão digital do Governo do Estado do Pará [3]. Este programa prevê a instalação de redes banda larga metropolitanas através de acesso fixo sem fio, utilizando a faixa de frequência ISM (Industrial, Scientific and Medical) em 5,8 GHz.

Tomando como referência as redes instaladas nestas cidades, a coleta de dados foi realizada remotamente pela rede de comunicação do projeto através da Empresa de Processamento de Dados do Estado do Pará (PRODEPA). Desta forma, foi possível adquirir informações importantes para a criação do modelo de propagação. Os dados considerados relevantes no desenvolvimento do trabalho estão listados abaixo:

- Altura das estações base (rádios transmissores)
- Altura de instalação dos clientes (rádios receptores)
- Potência de transmissão
- Potência recebida pelos clientes
- Ganhos de transmissão
- Ganhos de recepção

Outra informação importante é o levantamento fotográfico da paisagem das cidades relacionadas, visando assim, descrever as características morfológicas das regiões em estudo e as similaridades entre as mesmas. Como exemplo, é mostrada na figura 4.1 uma vista da cidade de Santarém-PA.



Figura 4.1 - Vista de um trecho da cidade de Santarém-PA

Tomando a figura 4.1 como exemplo, percebe-se que há uma coexistência entre a vegetação e as construções existentes (comerciais e residenciais). Este é o padrão de ambiente encontrado nas cidades localizadas na região amazônica [12]-[13], caracterizada por locais densamente arborizados.

4.2.1 - Tratamento dos Dados

Antes de realizar os procedimentos de ajuste com base nos dados coletados, é necessário fazer a filtragem dos dados considerados espúrios (*outliers*) [14]. Neste trabalho, o procedimento adotado para a filtragem de *outliers* é baseado no corte pelo desvio padrão.

Sendo D_P o desvio padrão das medidas e L_{FIT} a curva de ajuste médio aos dados coletados, tida como $a + b \log(x)$, as condições para que um dado L_i seja considerado *outlier* são definidas abaixo:

$$L_i \text{ é outlier se } L_i > L_{FIT_i} + D_P \quad (4.1a)$$

$$L_i \text{ é outlier se } L_i < L_{FIT_i} - D_P \quad (4.1b)$$

4.2.2 - Medições no Campus Universitário

Além da coleta remota de dados feita nas 12 cidades, houve uma breve campanha de medição realizada no Campus básico da Universidade Federal do Pará (UFPA) onde também se encontra instalada uma estação base operando na faixa ISM 5,8 GHz.

Para as medições realizadas no Campus Básico da UFPA, foram utilizados os seguintes acessórios:

- Veículo automotor
- Tripé regulável
- Computador pessoal portátil (*notebook*)
- Inversor de corrente (alimentação dos equipamentos)
- GPS (*Global Positioning System*)
- Rádio cliente para recepção de sinal (CPE)
- Antena Omni direcional com ganho 7 dBi
- Software Matlab® R2009b
- Biblioteca de comunicação Net-SNMP

O *setup* de medição é mostrado na figura (trocar figura) a seguir:

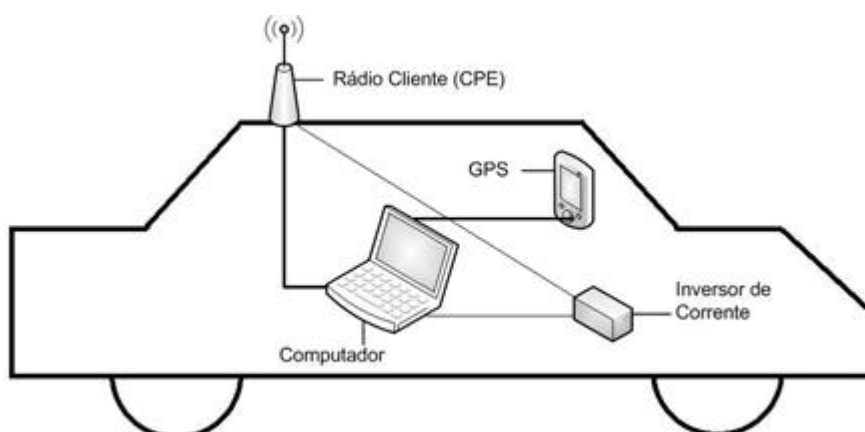


Figura 4.2 - Configuração dos equipamentos dentro da unidade móvel

O *setup* de medição visto na figura 4.2, mostra um computador ligado ao GPS e ao rádio cliente, realizando a coleta de dados, ou seja, potência recebida em uma determinada posição, especificada pelo GPS. O inversor de corrente é o elemento responsável pela conversão da tensão e corrente, gerados pela bateria da unidade móvel, em valores

compatíveis com o padrão de alimentação necessário para manter o computador e o CPE ativos. A aquisição dos dados (potência recebida) coletados pelo CPE foi realizada utilizando o protocolo de comunicação SNMP (Simple Network Management Protocol) [15] através da biblioteca de comunicação Net-SNMP [16]. A obtenção das coordenadas adquiridas pelo GPS foi feita com o uso do protocolo de comunicação NMEA (National Marine Electronics Association) [17] sendo que, a utilização de ambos os protocolos de comunicação foi implementada através de scripts e toolboxes nativos do software Matlab® R2009b [18].

As medições realizadas no campus básico da UFPA são importantes para a análise do problema devido à similaridade do ambiente com as cidades selecionadas para o desenvolvimento deste modelo. Entretanto, os dados coletados neste cenário serão usados apenas na avaliação do modelo proposto, não sendo estes, utilizados para o ajuste do mesmo. A figura a seguir mostra o percurso realizado, dentro do campus, em relação à estação base.

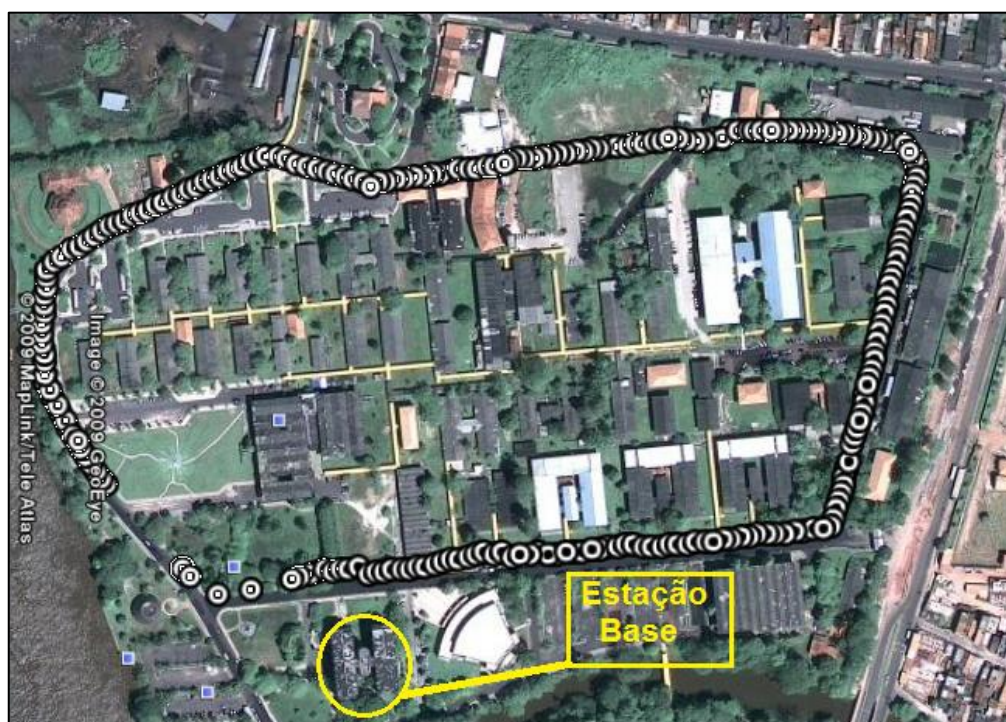


Figura 4.3 - Percurso realizado pela unidade móvel

Da figura 4.3, tem-se que a marcação com destaque amarelo mostra a localização da estação base dentro do campus e, os círculos brancos representam cada ponto medido durante o percurso realizado.

4.3 - PROPOSTA DO MODELO DE PROPAGAÇÃO

Com o intuito de representar as perdas de propagação obtendo melhor eficiência que os principais modelos descritos na literatura, também citados neste trabalho, é feita uma proposta de modelo de propagação tendo como referência o trabalho realizado em [12], onde foi criado um modelo de propagação derivado de campanhas de medição realizadas na frequência de 900 MHz. O objetivo é obter um novo modelo capaz prever as perdas de propagação em ambientes com características muito similares às apresentadas em [12]-[13]-[19], para frequências na faixa de 5,8 GHz, sendo estas utilizadas em diversos sistemas de comunicação sem fio banda larga.

4.3.1 - Modelo de Propagação para 5,8 GHz

Tendo como base o modelo apresentado em [19], a proposta de um novo modelo com as devidas alterações é baseada na seguinte equação:

$$L_{MP} = K_1 \log(d) + K_2 \log(f) + K_0 \quad (4.2)$$

Onde:

K_1 e K_2 - Parâmetros a serem obtidos com mínimos quadrados lineares

d - Distância, metros

f - Frequência, MHz

K_0 - Fator de correção

O fator de correção K_0 relaciona as alturas das antenas transmissoras, receptoras e, as alturas de possíveis obstruções (construções e vegetações) sendo também, uma função do comprimento de onda, de acordo com o mostrado na equação (4.4). O fator K_0 é determinado pelo seguinte polinômio de primeiro grau:

$$K_0 = a - bX \quad (4.3)$$

Onde:

a e b - Parâmetros a serem ajustados por mínimos quadrados lineares

X - Variável do polinômio

A variável X do polinômio é definida pela equação empírica (4.4):

$$X = \frac{(H_T + H_R)\lambda}{0.1H_{OB}} \quad (4.4)$$

Onde:

H_T - Altura da Estação base, em metros

H_R - Altura do rádio cliente, em metros

λ - Comprimento de onda, em metros

H_{OB} - Altura média das obstruções, em metros

O termo K_0 dentro do modelo de propagação tem grande importância, pois, o mesmo agrega fatores que são responsáveis diretos pelo cálculo final da perda de percurso, para um determinado sinal transmitido. De acordo com a equação (4.3), a variável X é responsável pela redução do valor final na equação (4.2), com isso, quanto maiores os valores de H_T e H_R em relação à H_{OB} , maior será a diminuição na perda total de propagação.

A inclusão do comprimento de onda é fundamental, pois para cada frequência de utilização, diferentes obstáculos são vistos em um mesmo ambiente, desta forma, a utilização do comprimento de onda não só representa uma dependência da frequência, como também, permite um ajuste futuro do modelo de propagação para outras faixas de frequências sob a condição da obtenção de dados coletados em campanhas de medição.

4.4 - AJUSTE COM MÍNIMOS QUADRADOS LINEARES

A técnica de ajuste com mínimos quadrados lineares apresenta bons resultados quando aplicada em processos de otimização, sendo usada também em outras áreas de pesquisa [20]. Para o ajuste de modelos de propagação, muitos trabalhos com os realizados em [4]-[5]-[6]-[21]-[22], utilizam este método para ajustar parâmetros de um modelo de propagação usando como referência, dados coletados em campanhas de medição.

O princípio básico contido neste processo é a minimização do somatório dos quadrados das diferenças entre os dados coletados e os dados simulados, ou seja, a minimização dos quadrados dos resíduos, também conhecidos com função objetivo:

$$F_{OBJ} = \sum_{i=1}^N (L_i - Y_i)^2 \quad (4.5)$$

Onde:

L_i - Dados coletados

Y_i - Dados simulados

O ajuste de parâmetros pela solução de mínimos quadrados lineares pode ser realizado pela utilização de derivadas parciais, buscando a minimização da função objetivo. Como exemplo, é mostrado o seguinte polinômio que deve ser ajustado para determinados dados coletados.

Dado a equação $Y = a + bX + cX^2$, deve-se ajustá-lo aos dados coletados L .

De posse desta equação, a próxima etapa é o cálculo das derivadas parciais da função objetivo em relação aos parâmetros a , b e c , igualando-as a zero. As equações decorrentes do cálculo das derivadas parciais formam um sistema cuja solução de mínimos quadrados resulta na obtenção dos parâmetros a , b e c .

Outra forma de representar a solução por mínimos quadrados é através da utilização de notações matriciais. Tomando como exemplo o polinômio mostrado anteriormente, são definidas as matrizes que compõem o sistema de equações normais:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & X_1 & X_1^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & X_i & X_i^2 \end{bmatrix} \quad x = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} L_1 \\ \vdots \\ L_i \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Com a utilização as definições mostradas em (4.7), a solução formal por mínimos quadrados é formulada através da seguinte expressão:

$$x = (A^T A)^{-1} A^T B \quad (4.8)$$

O vetor x representa a solução encontrada para a , b e c .

A solução numérica pode ser obtida pela decomposição ortogonal QR [23], mostrada a seguir:

$$A = QR \quad (4.9)$$

$$x = R^{-1}(Q^T B) \quad (4.10)$$

Onde:

Q - Matriz ortogonal

R - Matriz triangular superior

A decomposição QR se torna necessária devido a que o número de condição da matriz $A^T A$ é o quadrado do número de condição da matriz A , portanto, não se deve usar a matriz A diretamente, preferindo-se a decomposição QR, sendo esta mais estável. Na verdade, o número de condição da matriz A é igual ao número de condição da matriz R , sendo assim, a estabilidade numérica é mantida, pois, o número de condição da matriz Q é igual a um. O número de condição é uma medida da estabilidade numérica de operações com uma matriz, a saber, a inversão da matriz, a solução de um sistema linear ou o cálculo de autovalores da matriz.

4.4.1 - Ajuste do Modelo de Propagação Proposto

Diferentemente do trabalho apresentado em [6], onde foi realizado o ajuste dos parâmetros do modelo de propagação em uma única etapa, este trabalho propõe duas etapas para o ajuste do modelo proposto. O ajuste simultâneo de um grande número de parâmetros resulta no aumento da incerteza sobre cada um [24], desta forma, optou-se por realizar o ajuste dividido em etapas.

4.4.1.1 - Primeira Etapa

Com base nos dados coletados, é possível gerar uma curva média de ajuste (*fitting*), ou seja, uma curva que melhor descreva o comportamento dos dados coletados.

Computando a diferença entre a curva gerada com *fitting* e os dados coletados, tem-se um vetor de resíduos que será utilizado como referência para ajustar a equação (4.2) cuja mesma, incorpora o comprimento de onda e as alturas de transmissão, recepção e obstrução. Este vetor de resíduos, gerado com os dados coletados, é obtido com a seguinte equação:

$$R1_L = L - L_{FIT} \quad (4.9)$$

Onde:

L - Dados coletados

L_{FIT} - Dados obtidos com *fitting*

$R1_L$ - Vetor de resíduos

Depois de calculado o vetor de resíduos, pode-se ajustar a equação (4.4) montando-se as matrizes A , x e B , definidas em (4.7), e posteriormente, aplicá-las em (4.9) e (4.10) para obtenção dos parâmetros a e b .

$$A = \begin{bmatrix} 1 & X_1 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & X_i \end{bmatrix} \quad x = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} R1_{L_1} \\ \vdots \\ R1_{L_i} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

Em virtude das coletas de dados terem sido realizadas em locais onde as alturas das estações base eram as mesmas, o termo responsável pela variação de K_0 é a altura de instalação dos clientes (altura de recepção).

4.4.1.2 - Segunda Etapa

O passo seguinte é o ajuste dos demais parâmetros do modelo. Esta etapa utiliza como referência de ajuste, um segundo vetor de resíduos, entre os dados coletados e o parâmetro K_0 , determinado pela equação (4.11).

$$R2_L = L - K_0 \quad (4.11)$$

Seguindo o mesmo procedimento adotado para o ajuste de K_0 , as seguintes matrizes são obtidas:

$$A = \begin{bmatrix} \log(d_1) & \log(f) \\ \vdots & \vdots \\ \log(d_i) & \log(f) \end{bmatrix} \quad x = \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} R2_{L_1} \\ \vdots \\ R2_{L_i} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

O modelo proposto, ao final de tudo, será composto pela junção dos coeficientes (K_1 , K_2 e K_0) calculados pela solução de mínimos quadrados lineares.

4.5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia utilizada foi estruturada com intuito de garantir um ajuste eficiente do modelo proposto, buscando assim, uma melhor representação dos dados coletados. Neste capítulo, foi explanada a metodologia utilizada para a aquisição de dados nas 12 cidades selecionadas para o desenvolvimento deste trabalho. Outros dados foram coletados dentro do campus universitário com uso do setup de medição, também descrito neste capítulo, para obter medidas em sistemas com mobilidade.

Dentro do próximo capítulo, serão mostrados os resultados obtidos com a metodologia para filtragem de *outliers* e ajuste do modelo proposto. Além destes resultados, serão realizadas análises comparativas entre o desempenho do modelo proposto e os demais modelos de propagação, descritos anteriormente.

CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E ANÁLISE

5.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Modelos empíricos de propagação possuem suas vantagens, pois, são baseados em observações e medidas para representarem as características atenuantes do meio em estudo. Neste trabalho, Os dados (medidas) foram coletados em 12 cidades situadas no estado do Pará, região norte do Brasil, e no campus universitário da Universidade Federal do Pará (UFPA). De posse dos dados filtrados, o modelo proposto deve ser submetido a uma rotina de ajuste buscando assim, um melhor desempenho na predição de perdas quando comparado com outros modelos existentes na literatura.

5.2 - APLICAÇÃO DO AJUSTE AOS DADOS COLETADOS

Definidas as etapas a serem seguidas, tratadas no capítulo anterior, o ajuste dos parâmetros do modelo é realizado no ambiente computacional do software Matlab® R2009b. A integração com a técnica de mínimos quadrados se inicia com o termo que vincula o comprimento de onda e as alturas de transmissão, recepção e obstáculos. Posteriormente, ajustes serão realizados nos termos dependentes da distância e, da frequência de operação do sistema.

A utilização de duas etapas de ajuste é importante para controlar a influência de cada termo na predição da perda total de propagação do modelo.

5.2.1 - Filtragem de Dados Espúrios (*Outliers*)

Explanaada no capítulo 4, a filtragem de *outliers* é importante para a extração de dados que não caracterizam o comportamento médio nos ambientes de propagação, analisados nas 12 cidades em estudo. As perdas de propagação coletadas nos clientes das 12 cidades são mostradas na Figura 5.1. O ajuste aos dados coletados e a filtragem decorrente deste ajuste, são vistos nas Figuras 5.2 e 5.3, respectivamente.

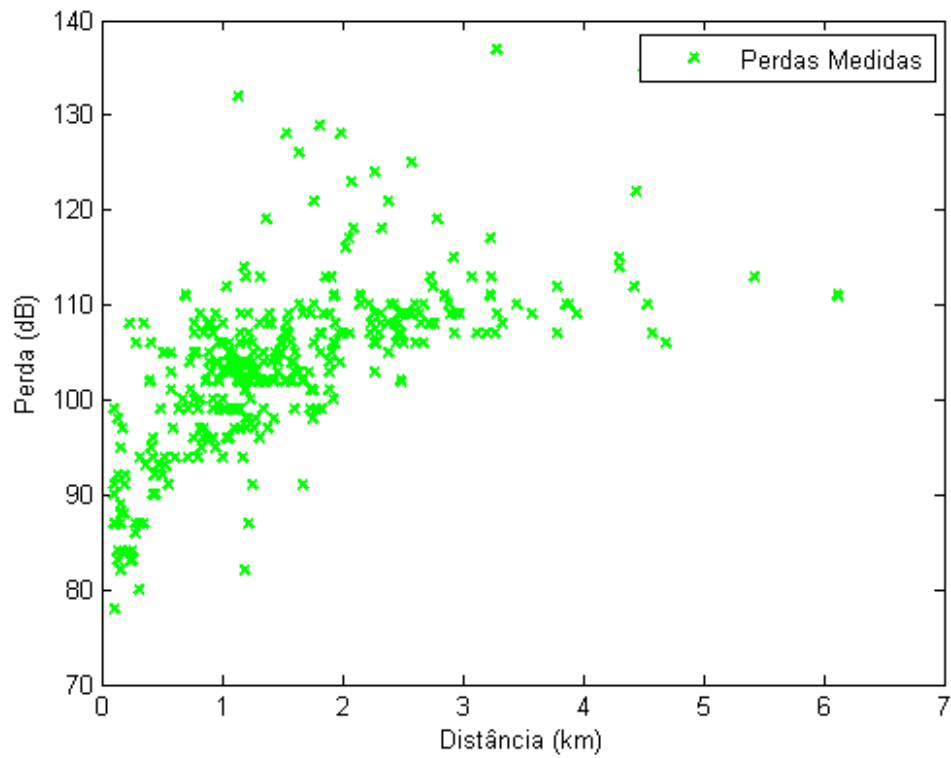


Figura 5.1 - Dados relativos às perdas de propagação nas 12 cidades em estudo

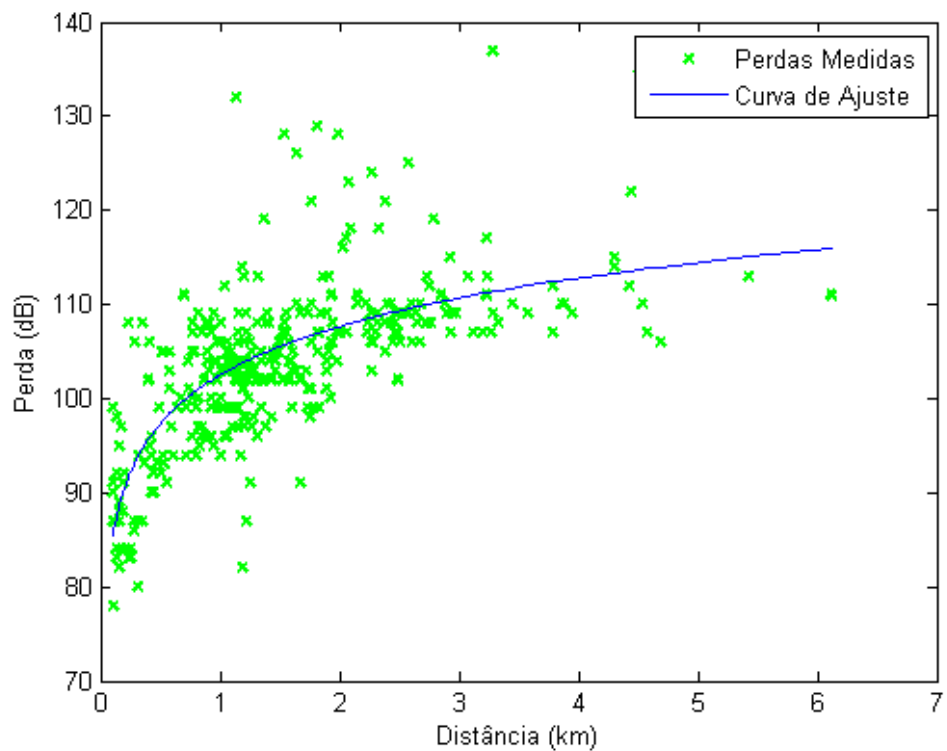
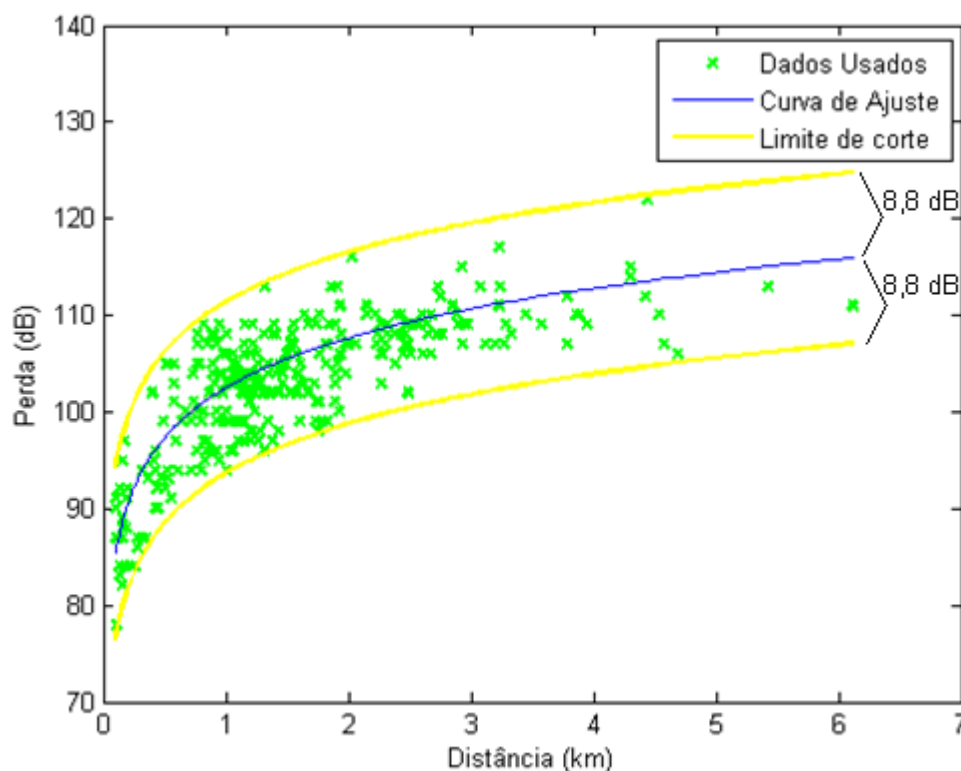


Figura 5.2 - Curva de ajuste aos dados coletados nas 12 cidades em estudo



5.3 - Filtragem dos dados coletados nas 12 cidades com base no limite de corte

Utilizando o desvio padrão das medidas (8,8 dB) como limite de corte, foram conservados aproximadamente 90% dos dados coletados. É importante frisar que esta filtragem manteve grande parte dos dados, sendo este um fator importante para se obter a caracterização média de propagação nos ambientes em estudo.

5.2.2 - Ajuste do Parâmetro K_0

Antes de iniciar o ajuste do parâmetro K_0 , é necessário coletar amostras medidas em intervalos de 100 metros com intuito de verificar as perdas dependentes apenas da variação da altura de recepção dos clientes instalados nas 12 cidades.

O critério adotado para selecionar os intervalos, com número relevante de amostras, é baseado na análise do histograma dos dados filtrados coletados em função da distância. Na figura 5.4, é mostrado um histograma com 100 bins (classes ou barras) de resolução.

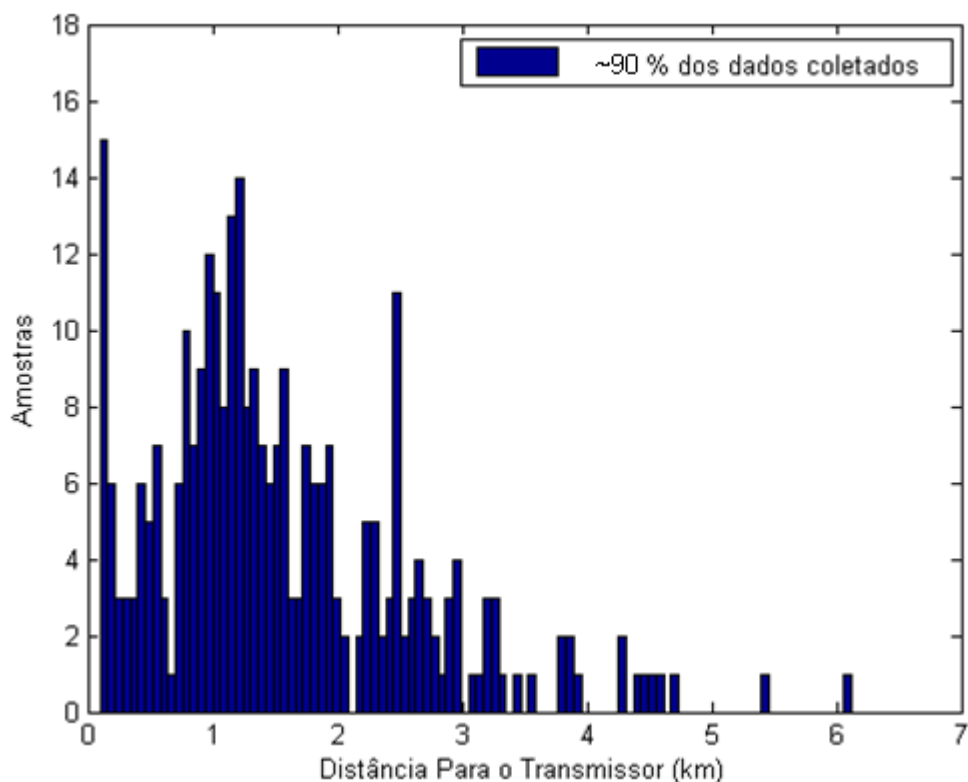


Figura 5.4 - Incidência de amostras para diversas distâncias

Pelo histograma, são obtidos os intervalos selecionados para a coleta dos dados e posterior ajuste do parâmetro do modelo. A Tabela 5.1 contém os dados que serão utilizados.

Tabela 5.1 - Dados coletados para cada intervalo de distância

Intervalo de Coleta	Incidência de Amostras
Entre 80 e 180 metros	16
Entre 750 e 850 metros	15
Entre 0,95 e 1,05 Quilômetros	19
Entre 1,5 e 1,6 Quilômetros	11
Entre 2,4 e 2,5 Quilômetros	8

Selecionadas as amostras para cada intervalo de distância, a equação (4.3), relativa ao parâmetro K_0 , é submetida ao algoritmo de ajuste por mínimos quadrados. Os resultados obtidos para cada grupo de amostras são mostrados nas Figuras 5.5, 5.6, 5.7, 5.8 e 5.9:

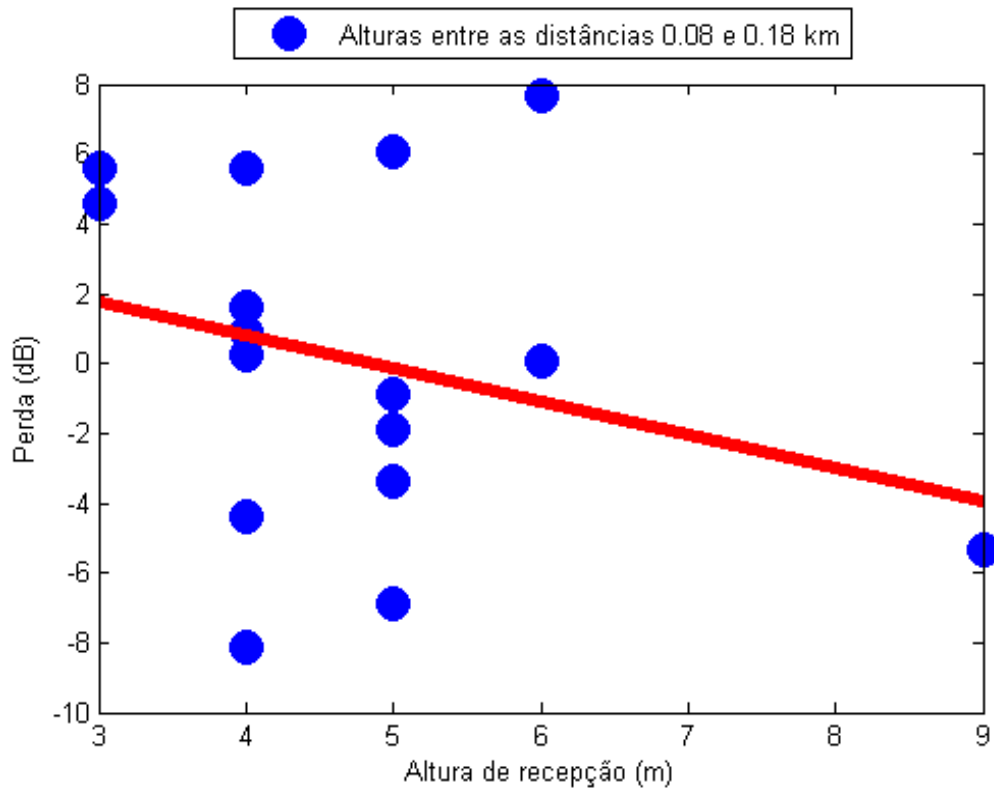


Figura 5.5 - Ajuste para dados coletados entre 80 e 180 metros

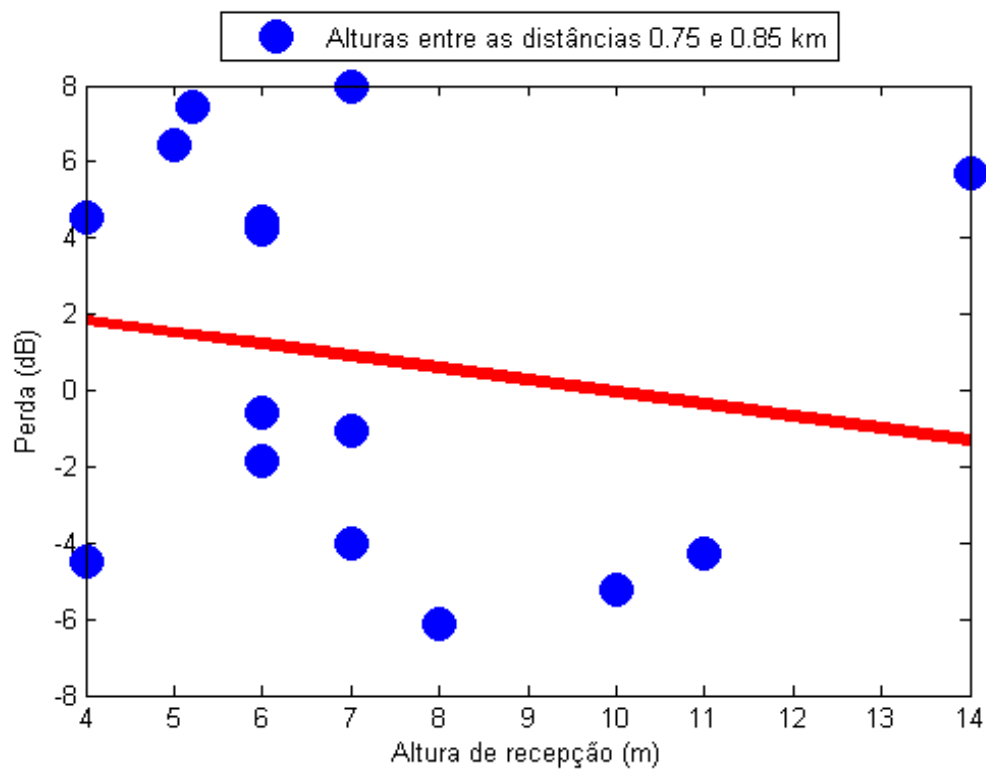


Figura 5.6 - Ajuste para dados coletados entre 750 e 850 metros

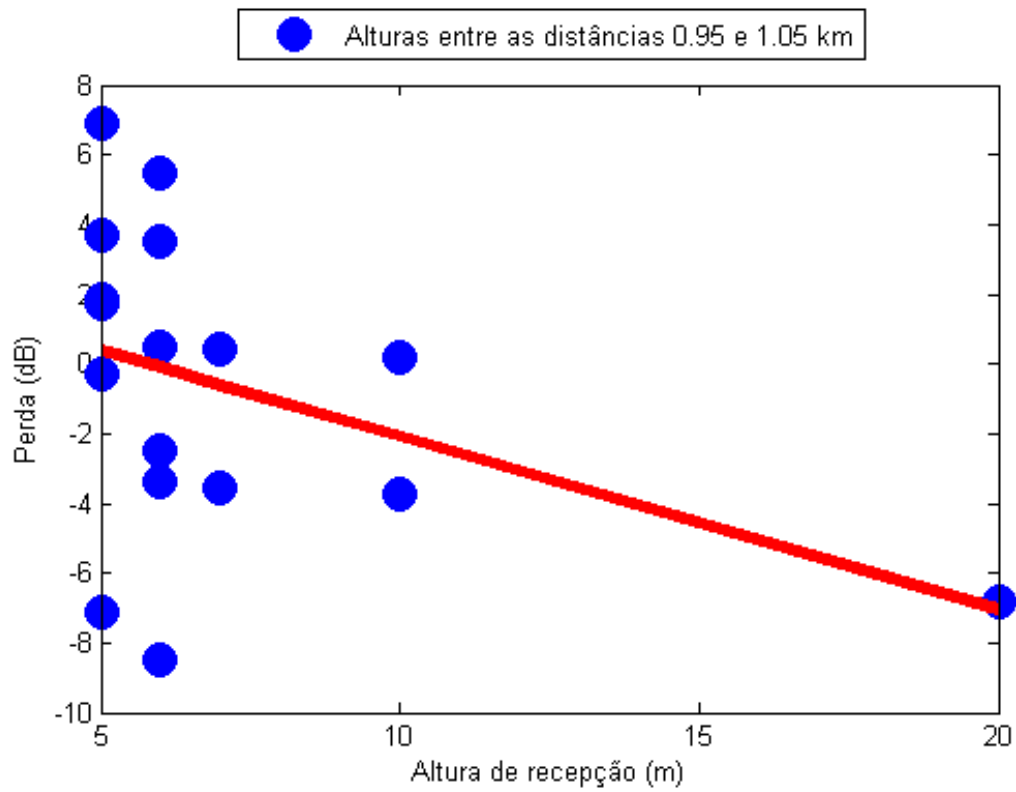


Figura 5.7 - Ajuste para dados coletados entre 0,95 e 1,05 quilômetros

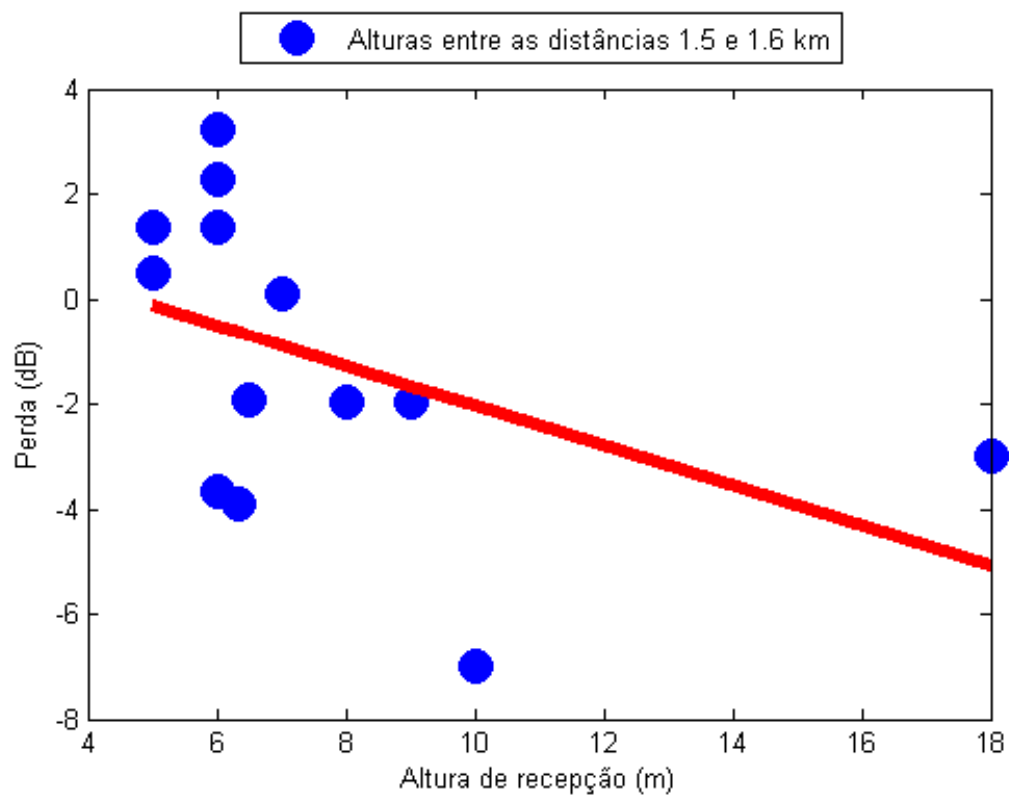


Figura 5.8 - Ajuste para dados coletados entre 1,5 e 1,6 quilômetros

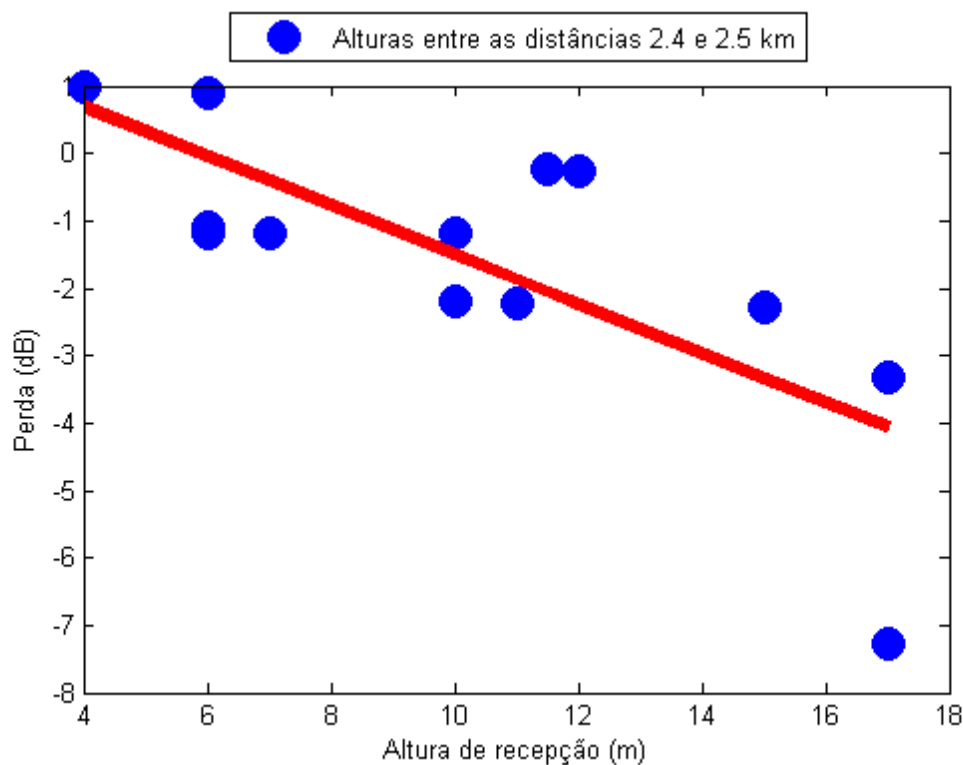


Figura 5.9 - Ajuste para dados coletados entre 2,4 e 2,5 quilômetros

De acordo com os ajustes realizados em cada grupo de amostras, foi gerada uma tabela com os valores calculados de a e b . Estes dados e o valor médio obtido são mostrados na tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Parâmetros obtidos para cada intervalo de distância

Intervalo de Coleta	Parâmetro a	Parâmetro b
Entre 80 e 150 metros	79,6	15,5
Entre 750 e 850 metros	27,9	5,8
Entre 0,95 e 1,05 quilômetros	41,8	7,5
Entre 1,5 e 1,6 quilômetros	31,9	5,8
Entre 2,4 e 2,5 quilômetros	31	5,6
Valor Médio	42,5	7,6

5.2.3 - Ajuste dos Demais Parâmetros

Finalizada a primeira etapa de ajustes, os valores médios obtidos nos parâmetros a e b são então armazenados para posterior utilização no modelo proposto. A próxima etapa é baseada no ajuste dos demais parâmetros da equação (4.2) com exceção do termo K_0 ,

ajustado anteriormente. De acordo com os procedimentos de ajuste definidos no capítulo 4 deste trabalho, foram encontrados os seguintes valores para K_1 e K_2 :

Tabela 5.3 – Valores obtidos nos parâmetros restantes

Parâmetro	Valor obtido
K_1	16.5
K_2	14.2

5.3 - AVALIAÇÃO DO MODELO PROPOSTO

De posse de todos os parâmetros necessários para a simulação do modelo proposto, o próximo passo é a etapa de avaliação. Para tanto, os modelos COST-231 Hata e IEEE 802.16 (SUI) serão juntamente avaliados com o modelo proposto neste trabalho. O objetivo é validar a eficiência do modelo obtido em relação aos outros modelos, sendo que, os mesmos serão submetidos aos dados coletados em ambientes que caracterizam sistemas fixos e com mobilidade. Apesar de o Modelo Proposto ter sido originado de dados coletados em sistemas fixos, é importante avaliar seu desempenho em sistemas com mobilidade, tendo em vista que, os demais modelos foram obtidos de dados coletados em sistemas móveis.

5.3.1 - Procedimentos de Avaliação

Obtido o modelo de propagação ajustado, se faz necessária, uma avaliação com o intuito de validar a sua eficiência sobre outros modelos. Este procedimento tomará como referência, os dados utilizados para o ajuste do modelo e, medidas realizadas em outro sistema sem fio na mesma faixa de frequência, apresentando características de mobilidade diante da estação base (transmissor). As métricas de desempenho utilizadas na avaliação foram o erro RMS e o desvio padrão.

5.3.1.1 - Avaliação em Sistemas Fixos

Nesta etapa, o modelo proposto, juntamente com os modelos COST321-Hata e IEEE 802.16 (SUI), são avaliados com relação aos dados coletados nas redes de comunicação banda larga fixas, operantes em algumas cidades situadas na região

amazônica. Estes dados foram filtrados e usados para o ajuste do modelo proposto. A Figura 5.10 mostra o comportamento do modelo proposto em relação aos dados coletados.

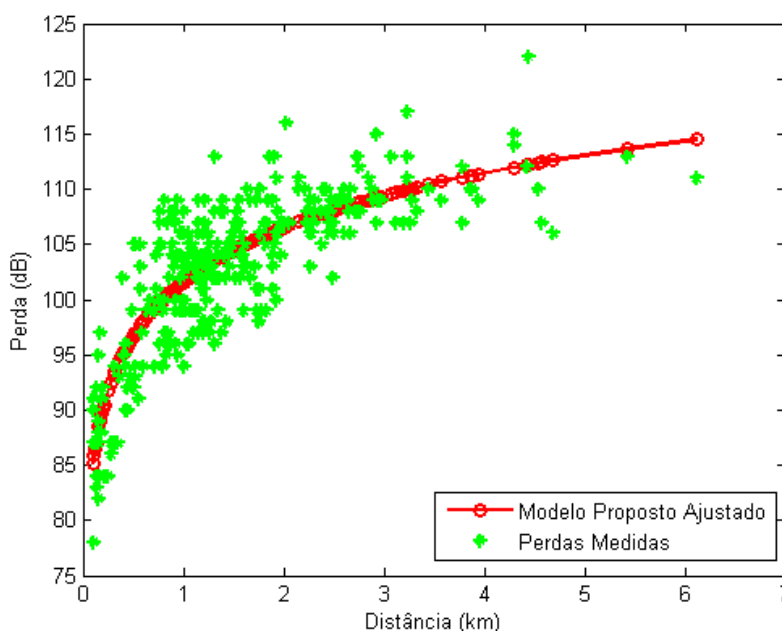


Figura 5.10 - Modelo proposto em relação aos dados coletados nas 12 cidades em estudo

De acordo com a figura 5.10, tem-se que o modelo proposto obteve um erro RMS de 3.8 dB e um desvio padrão de 2.3 dB. A seguir, é mostrado nas Figuras 5.11 e 5.12, o comportamento do modelo proposto e os demais modelos (SUI e COST231-Hata) em relação às perdas medidas nas 12 cidades em estudo.

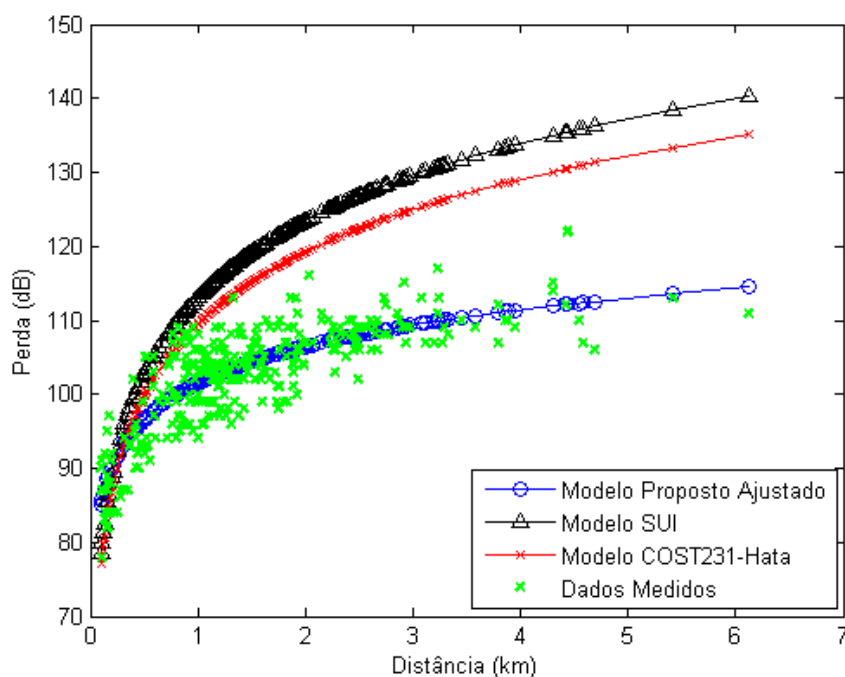


Figura 5.11 - Desempenho dos modelos de propagação em escala linear

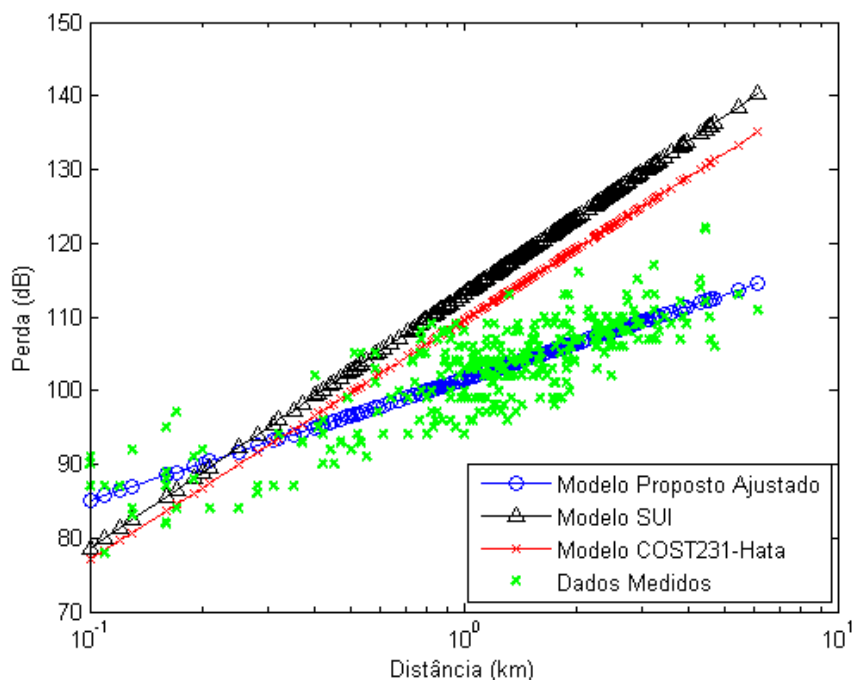


Figura 5.12 - Simulação dos modelos de propagação em escala logarítmica

Conforme observado nos resultados mostrados nas Figuras 5.11 e 5.12, o modelo proposto obteve a melhor representação da perda média de propagação encontrada nas 12 cidades em estudo, tendo em vista que, os demais modelos de propagação apresentaram erros RMS acima de 10 dB e desvios padrões acima de 5 dB. Para visualizar melhor os resultados obtidos, a Tabela 5.4 mostra o desempenho de cada modelo.

Tabela 5.4 - Desempenho dos Modelos de Propagação para todos os dados coletados nas 12 cidades selecionadas

Modelo de Propagação	Erro RMS (dB)	Desvio Padrão (dB)
Modelo Proposto	3,8	2,3
Modelo SUI	14,9	6
Modelo COST231-Hata	11,4	5,2

5.3.1.2 - Avaliação em Sistemas Móveis

A figura 5.13 mostra a simulação realizada para os dados coletados no campus universitário, cujo ambiente apresenta características de mobilidade, representadas pela baixa altura de recepção e grande flutuação na magnitude do sinal recebido. É importante frisar que os parâmetros ajustados com os dados coletados nas 12 cidades foram utilizados nestas simulações.

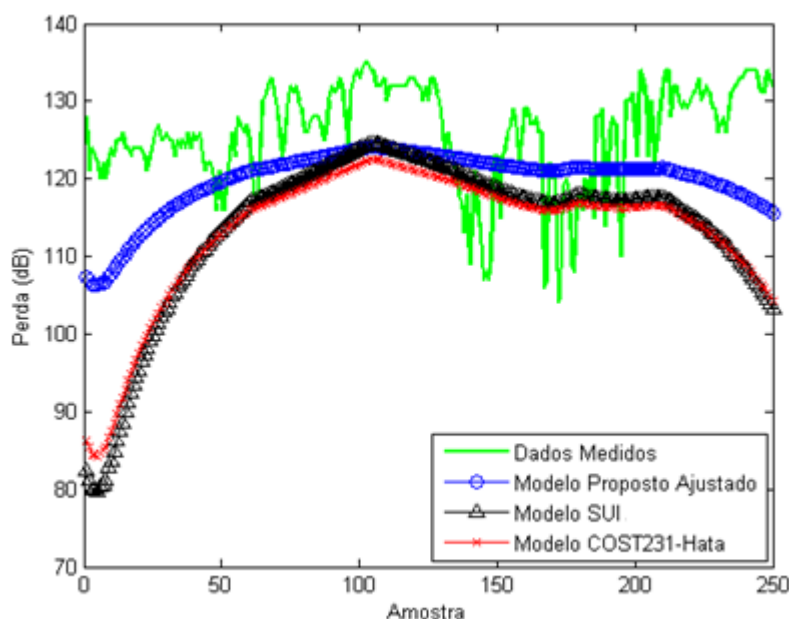


Figura 5.13 - Simulação dos modelos de propagação para 250 amostras de medidas realizadas com mobilidade

Observando a Figura 5.13, verifica-se que apesar de o modelo proposto não ter sido projetado para a predição de perdas em sistemas com mobilidade, este ainda representa a perda de propagação com melhor eficiência que os demais modelos. A Tabela 5.5 mostra os resultados obtidos.

Tabela 5.5 - Desempenho dos Modelos de Propagação para medidas em sistemas com mobilidade

Modelo de Propagação	Erro RMS (dB)	Desvio Padrão (dB)
Modelo Proposto	9,2	4,4
Modelo SUI	16,3	9,8
Modelo COST231-Hata	15,9	8,7

5.3.1.3 - Avaliação de Predição de Perdas em cada Cidade

Anteriormente, foram realizados os ajustes do modelo proposto e a avaliação de seu desempenho sobre outros modelos de propagação, com base nos dados coletados nas 12 cidades. Isto posto, se faz necessária a análise de seu comportamento, tomando como referência, as medidas coletadas em cada cidade utilizada na composição do conjunto dos dados usados neste trabalho. Os parâmetros do modelo de propagação proposto foram mantidos, assim, pode-se avaliar a sua eficiência em cada uma das 12 cidades em estudo.

A seguir, serão mostradas as predições de perda de propagação para as 12 cidades nas Figuras 5.14 e 5.15, bem como seus respectivos erros RMS (ER) e desvios padrões (DP), em dB, mostrados na Tabela 5.6.

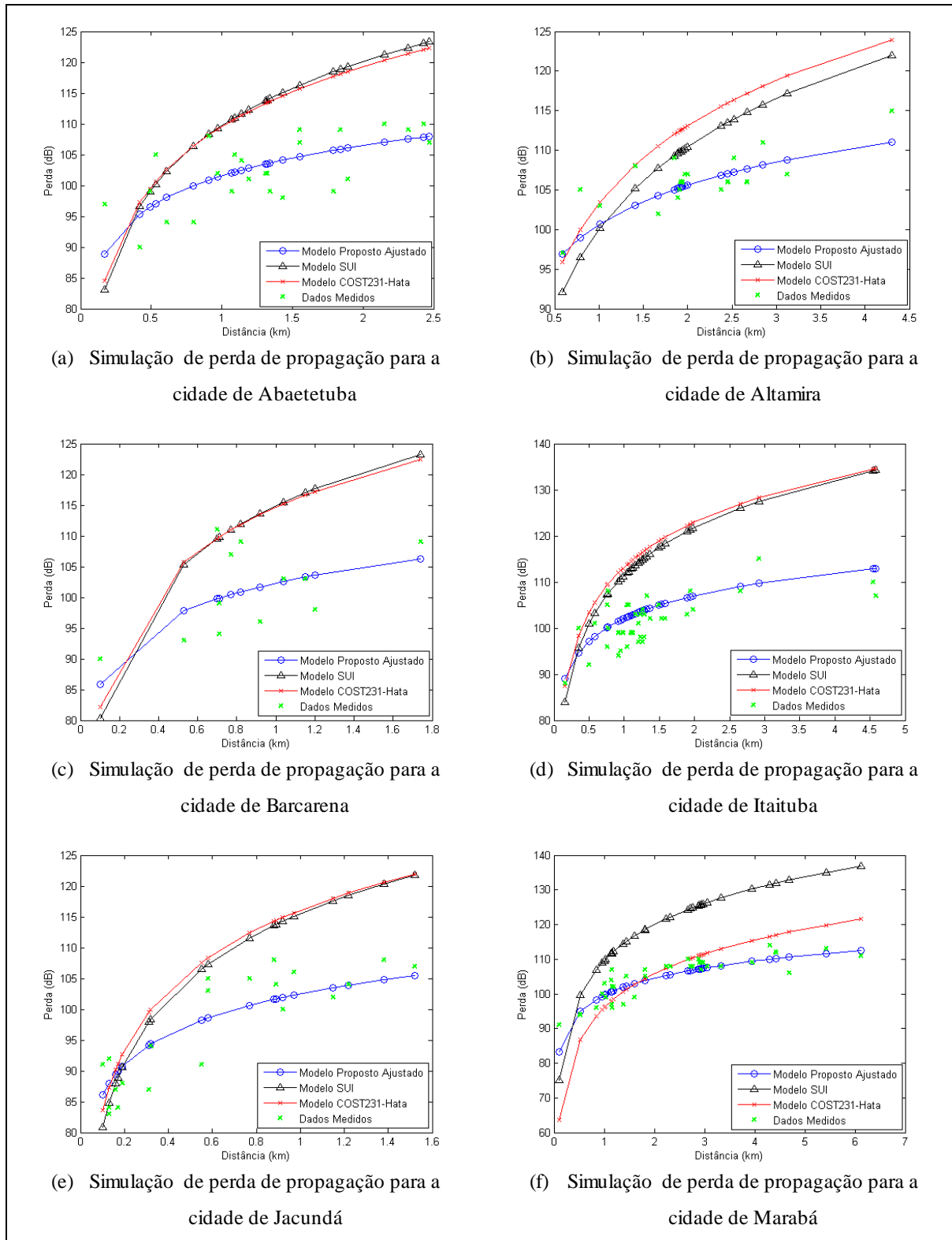


Figura 5.14 - Simulação dos modelos de propagação para as cidades de Abaetetuba (a), Altamira (b), Barcarena (c), Itaituba (d), Jacundá (e) e Marabá (f)

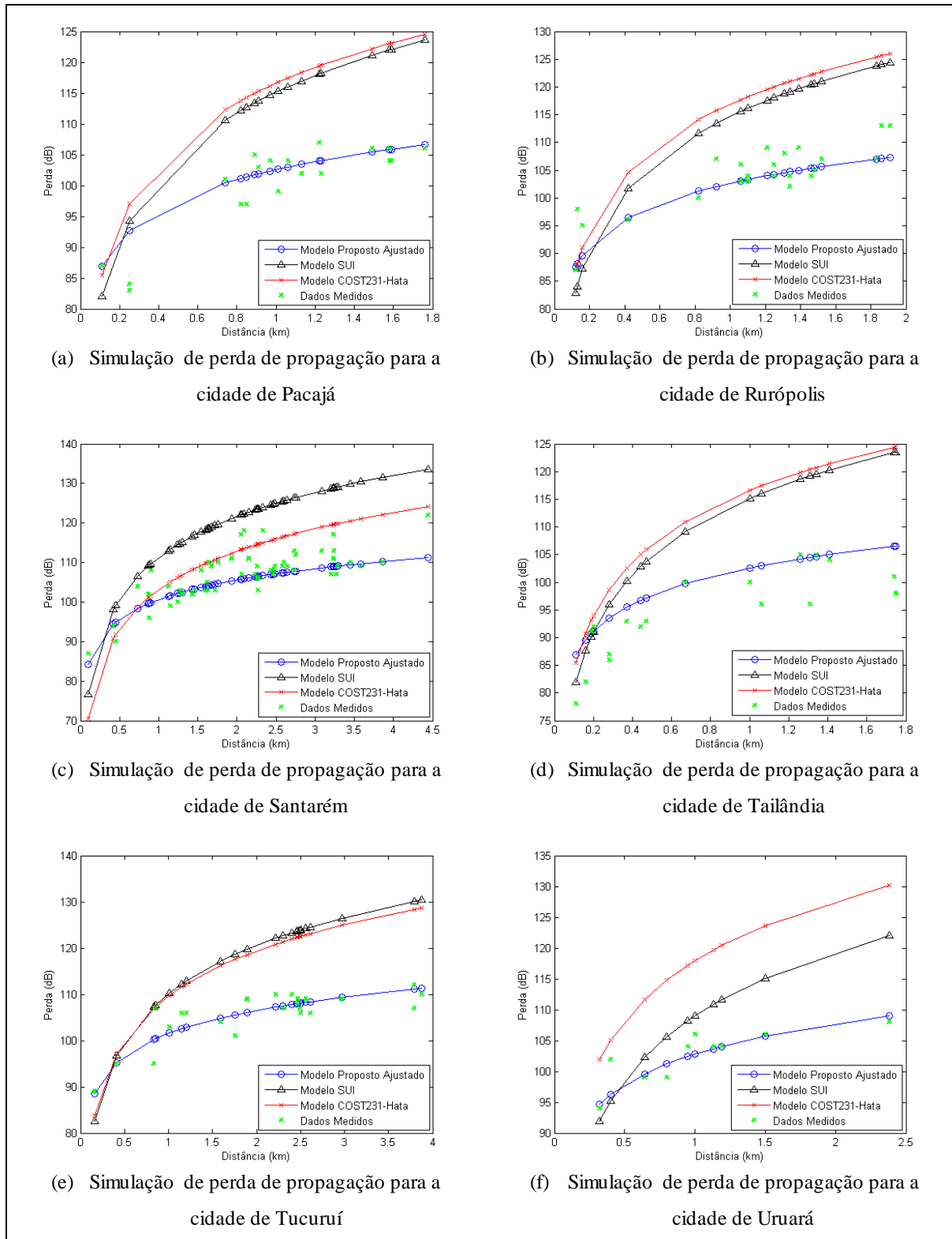


Figura 5.15 - Simulação dos modelos de propagação para as cidades de Pacajá (a), Rurópolis (b), Santarém (c), Tailândia (d), Tucuruí (e) e Uruará (f)

Tabela 5.6 - Desempenho dos Modelos de Propagação para medidas coletadas nas 12 cidades selecionadas

Cidades	Modelo Proposto		Modelo SUI		Modelo COST231-Hata	
	ER	DP	ER	DP	ER	DP
Abaetetuba	4,3	2,2	11,6	4,9	11,1	4,6
Altamira	2,6	1,5	5,8	2,4	7,4	3,4
Barcarena	5,6	3,2	12,5	5,8	12,2	5,7
Itaituba	4,1	2,2	13,8	5,7	15,1	5,9
Jacundá	4,3	2,1	9,4	5,1	9,9	4,6
Marabá	3	1,7	15,8	5,2	6,6	4,8
Pacajá	3,6	2,6	13,7	3,6	15,1	4,2
Rurópolis	3,6	2	12,1	3,4	13,6	4,4
Santarém	4,4	3	14,5	4,9	7,1	3,5
Tailândia	5,3	3,2	14,1	7,3	15,5	6,9
Tucuruí	2,6	1,7	14,4	5,7	13,2	5,3
Uruará	2,2	1,7	7,1	3,5	14,5	5,3

Nas Figuras 5.14, 5.15 e na tabela 5.6, são mostrados os resultados obtidos para as 12 cidades citadas nesse trabalho. A seguir, as curvas do erro RMS e desvio padrão obtidas pelos modelos de propagação avaliados, podem ser visualizadas nas figuras 5.16 e 5.17.

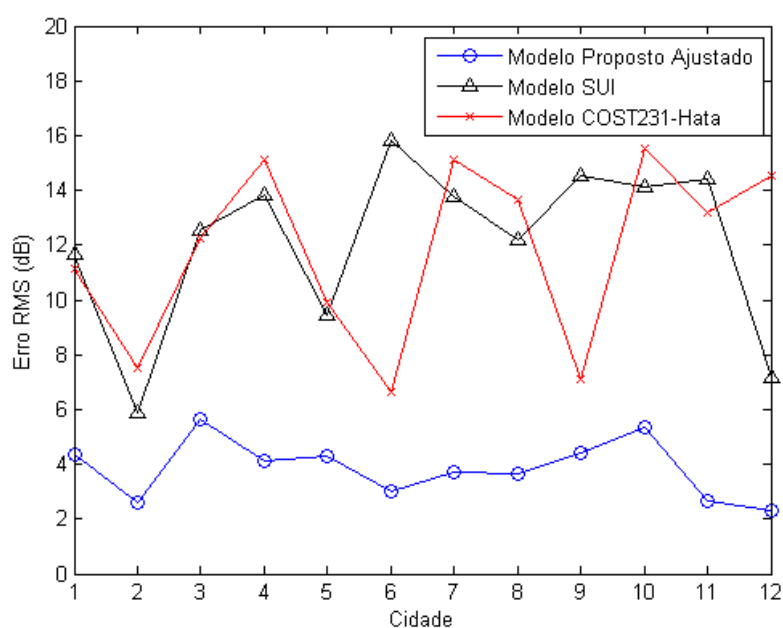


Figura 5.16 - Erros RMS obtidos pelos modelos de propagação nas 12 cidades

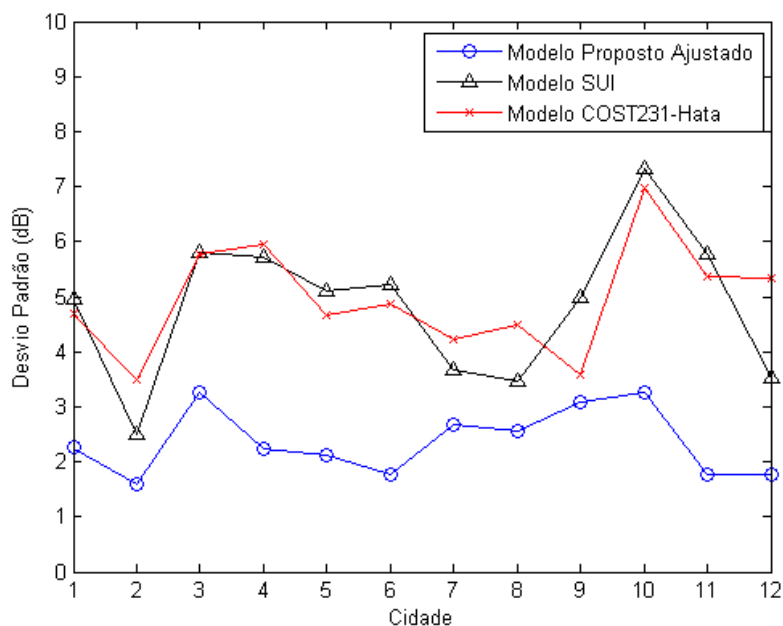


Figura 5.17 - Desvios padrões obtidos pelos modelos de propagação nas 12 cidades

Com base nos gráficos mostrados nas Figuras 5.16 e 5.17, os resultados mostram que o modelo proposto manteve certa regularidade quando aplicado em cada cidade, apesar de poucas elevações no erro RMS e no desvio padrão, verificados em duas cidades (Barcarena e Tailândia). Os demais modelos, SUI e COST231-Hata, apresentaram oscilações sensíveis em suas previsões em ambas as métricas de desempenho, desta forma, percebe-se a dificuldade dos mesmos em caracterizar a perda de propagação no cenário em estudo.

5.4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia empregada neste trabalho objetivava um eficiente ajuste do modelo proposto através de duas etapas, com uso da técnica de mínimos quadrados lineares. Observando-se os resultados obtidos, é constatada a boa concordância do modelo proposto com os dados medidos, quando comparados com os modelos SUI e COST231-Hata. Os valores dos desvios padrões obtidos pelo modelo proposto são inferiores aos encontrados nos outros modelos, sendo este um indicativo de uma maior certeza conferida ao modelo proposto para a previsão de perdas de propagação.

As medidas realizadas no campus universitário, apesar de apresentarem características diferentes (mobilidade) das encontradas nos dados coletados nas 12 cidades, também foram utilizadas como referência de avaliação. O modelo proposto, em presença

destes dados, também apresentou melhor desempenho sobre os outros modelos, apesar de os modelos SUI e COST231-Hata serem capazes de prever a perda de propagação em ambientes com mobilidade.

A importância de se avaliar o desempenho do modelo proposto com outros dados reside no fato de que é prevista a realização de ajustes futuros no modelo proposto, tornando-o capaz de prever com eficiência, as perdas de propagação em ambientes que apresentem mobilidade em relação ao percurso transmissor-receptor.

CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como foco a elaboração de um modelo de propagação capaz de representar a atenuação de ondas de rádio emitidos na faixa ISM 5,8 GHz em cidades típicas da região amazônica. O ambiente em questão apresenta como características a coexistência entre vegetações e construções (comerciais e residenciais) sendo estes, os principais responsáveis pela atenuação do sinal no percurso realizado pelo mesmo.

A análise do modelo proposto se baseou em um estudo comparativo com os modelos COST231-Hata e SUI. Para tanto, foram usados como métricas de desempenho o erro RMS e o desvio padrão, ambos com relação aos dados coletados nas cidades pertencentes à região em estudo. O modelo proposto obteve um erro RMS de 3,8 dB e um desvio padrão de 2,3 dB, ao passo que, os modelos SUI e COST231-Hata obtiveram erros RMS acima de 10 dB e desvios padrão acima de 5 dB. Os resultados foram determinantes para visualizar o bom desempenho do modelo proposto. Também foi comprovado que os modelos SUI e COST231-Hata não representam com eficiência as características atenuantes do âmbito amazônico.

É importante ressaltar que os outros modelos submetidos à avaliação, também obtiveram resultados inferiores ao modelo proposto mesmo quando o ambiente apresentava mobilidade (medição no *campus* universitário). Fato este que mostra a eficiência do modelo proposto mesmo em um ambiente para qual não foi projetado, tendo em vista que, os demais modelos foram derivados em campanhas de medição realizadas com mobilidade.

Para trabalhos futuros, são previstos ajustes no modelo proposto adequando-o para um melhor desempenho em outras faixas de frequências, incluindo as situadas em 2,4 e 3,5 GHz. Outra meta importante é a realização de modificações no modelo proposto, visando melhorar sua eficiência na predição de perdas em ambientes com mobilidade. É prevista uma derivação do modelo proposto, baseada em análise *Cross-Layer*, para modelagem do desempenho de sistemas banda larga sem fio, ainda com abordagem empírica.

REFERÊNCIAS

- [1] - T. S. Rappaport, “*Wireless Communications Principles and Practice*”, EUA, Prentice Hall, 2nd Edition, 2002.
- [2] - J.G. Andrews, A. Ghosh, R. Muhamed, “*Fundamentals of Wimax: Understanding Broadband Wireless Networking*”, EUA, Prentice Hall, 2007.
- [3] - Projeto NavegaPará, <http://www.navegapara.pa.gov.br>, acessado em 27/04/2010
- [4] - Y.H. Chen & K.L. Hsieh, “*A Dual Least-Square Approach of Tuning Optimal Propagation Model for Existing 3G Radio Network*”, IEEE 63rd Vehicular Technology Conference, Vol.6, PP. 2942-2946, Maio 2006.
- [5] - M. Yang & W. Shi, “*A Linear Least Square Method of propagation Model Tuning for 3G Radio Network Planning*”, Fourth International Conference on Natural Computation, Vol. 6, pp. 150-154, Outubro 2008.
- [6] - G.R. Pallardó, “*On DVB-H Radio Frequency Planning: Adjustment of a Propagation Model Through Measurement Campaign Results*”, Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Gävle, Suécia, Março 2008.
- [7] - H.R. Anderson, “*Fixed Broadband Wireless System Design*”, Inglaterra, John Wiley & Sons, 2003.
- [8] - S.R. Saunders, “*Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems*”, New York, John Wiley & Sons, 1999.
- [9] - K.R. Schaubach, N.J. Davis, T.S. Rappaport, “*A ray tracing method for predicting path loss and delay spread in microcellular environments*”, IEEE 42nd Vehicular Technology Conference”, Vol. 2, pp. 932-935, Maio 1992.
- [10] - V. Erceg et. al, “*Channel models for fixed wireless application*”, Tech. rep. IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group, Janeiro 2001.
- [11] - V. Erceg et. al, “*An empirically based path loss model for wireless channels in suburban environments*”, IEEE JSAC, vol. 17, no. 7, pp. 1205-1211, Julho 1999.
- [12] - J.C. Rodrigues, S.G.C. Fraiha, H.S. Gomes, G.P.S. Cavalcante, “*Path Loss Model for Densely Arboreous Cities in Amazon Region*”, International Conference on Microwave and Optoelectronics, pp. 629-632, Julho 2005.
- [13] - J.C. Rodrigues, S.G.C. Fraiha, H.S. Gomes, G.P.S. Cavalcante, A.R.O. de Freitas, G.H.S. Carvalho, “*Channel Propagation Model for Mobile Network Project in Densely Arboreous Environments*”, Journal of Microwaves and Optoelectronics, Vol. 6, N° 1, pp. 236-248, Junho 2007.

- [14] - V. Barnett & T. Lewis, "*Outliers in Statistical Data*", John Wiley & Sons, 3ª edição, 1994.
- [15] - S.M. Feit, "*SNMP: A Guide to Network Management*", McGraw-Hill, Setembro 1994.
- [16] - Biblioteca Net-SNMP, <http://www.net-snmp.org>, acessado em 27/04/2010
- [17] - A. El-Rabbany, "Introduction to GPS: The Global Positioning System", Artech House, 2ª edição, Agosto 2006.
- [18] - Stephen J. Chapman, "*Essentials of MATLAB Programming*", CL-Engineering, 2ª edição, Novembro 2008.
- [19] - S.G.C. Fraiha, J.C. Rodrigues, H.S. Gomes, G.H.S. Carvalho, G.P.S. Cavalcante, "*The compromise with the covered area and the Bit Error Rate in a suburban environment densely arboreous*", International Telecommunications Symposium, pp. 456-460, Setembro 2006.
- [20] - H. Motulsky & A. Christopoulos, "*Fitting Models to Biological Data Using Linear and Nonlinear Regression*", Graphpad Prizm, Califórnia, 2003.
- [21] - B.S.L. Castro, I.R. Gomes, F.C.J. Ribeiro, G.P.S. Cavalcante, "*COST231-Hata and SUI Models Performance Using a LMS Tuning Algorithm on 5.8 GHz in Amazon Region Cities*", European Conference on Antennas and Propagation-EUCAP, 2010
- [22] - M.C. Walden, F.J. Rowsell, "*Urban Propagation Measurements and Statistical Path Loss Model at 3.5 GHz*", IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Vol. 1A, pp. 363-366, Julho 2005.
- [23] - Egecioglu Ö., Srinivasan, A., "Givens and Householder Reductions for Linear Least Squares on a Cluster of Workstation", Proc. Int. Conf. on High Performance Computing (HiPC), New Delhi, pp. 734-739, 1995.
- [24] - W. Feller, "An Introduction to Probability Theory and Its Applications", Wiley, 2ª edição, Janeiro 1991.