

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Comparação Entre Modelos Empíricos e Semi-empíricos de Predição de Cobertura Móvel Celular: Estudo de Caso em Ambiente Outdoor

Marcelo Eustáquio Pereira Elias

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Amílcar Careli César

São Carlos, SP

Janeiro de 2005



Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço... 03 / 02 / 05

Ass.: *César*

DEDALUS - Acervo - EESC



31100050814

Class.	TESE EESC ✓
Con.	F1932
Tombo	T041105
Sigilo	1425996

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

E42c

Elias, Marcelo Eustáquio Pereira

Comparação entre modelos empíricos e semi-empíricos de predição de cobertura móvel celular : estudo de caso em ambiente outdoor / Marcelo Eustáquio Pereira Elias. -- São Carlos, 2005.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 2005.

Área: Engenharia Elétrica.

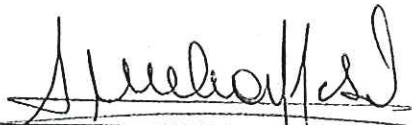
Orientador: Prof. Dr. Amílcar Careli César.

1. Comunicações sem fio.
2. Comunicação móvel celular.
3. Modelos de predição.
4. Ambiente de cobertura outdoor.
5. Medidas de potência de sinal recebido. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

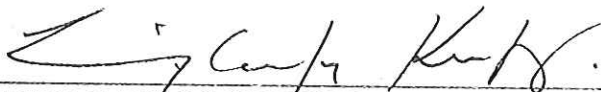
Candidato: Engenheiro MARCELO EUSTÁQUIO PEREIRA ELIAS

Dissertação defendida e julgada em 14-01-2005 perante a Comissão Julgadora:



Prof. Associado **AMÍLCAR CARELI CÉSAR (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO



Prof. Dr. **LUIZ CARLOS KRETLY**
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

APROVADO



Prof. Associado **LUIZ GONÇALVES NETO**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado



Prof. Associado **HOMERO SCHIABEL**
Vice-Coordenador em exercício do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica



Profª. Titular **MARIA DO CARMO CALJURI**
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

Dedico este trabalho à minha esposa Celinha e aos meus maravilhosos filhos, Guilherme e Ana Luísa, fiéis companheiros na dura batalha da vida. Sem eles, certamente não teria obtido sucesso em minha trajetória.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer, em primeiro lugar, a Deus, por ter concedido todos os elementos necessários à concretização deste sonho.

Ao professor Amílcar Careli César, pela confiança depositada desde a minha chegada ao departamento e pela excelente orientação dos trabalhos.

Aos professores José Carlos Pereira, Murilo Araújo Romero, Ben-Hur Viana Borges e Luiz Gonçalves Neto, pela compreensão nos momentos difíceis e pelo compartilhamento de seus conhecimentos técnico-científicos.

A todos os colegas dos cursos de mestrado e doutorado, companheiros inseparáveis, que em muito contribuíram para amenizar as dores desta árdua caminhada.

A todos os funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da EESC/USP e da biblioteca da EESC/USP, pela excelência no atendimento e colaboração.

A minha família, pelo apoio dado nos momentos de desânimo e pela compreensão, durante minha ausência em casa.

Aos senhores Fernando Melo Lopes, Guiarone Tobias Arantes jr. e Rui Pereira no início dos trabalhos, ao grande amigo e colega de profissão Marcelo Lucas, pelos apoios intelectual e pessoal, sempre que necessário, assim como ao amigo Cláudio Francisco Ribeiro, pelo auxílio na edição das figuras.

Aos meus amigos da CTBC Celular, Plínio Gustavo Branquinho, Jesus Cristiano de Carvalho, Henrique Amaral de Omena, Flavio Castro Vasconcelos, Daniel Ricardo Cunha Oliveira e André Luis de Paula, pela boa convivência profissional durante minha passagem por esta empresa, pelo auxílio em algumas questões técnicas e na realização dos testes de campo.

"Se esse conhecimento pudesse ser obtido simplesmente pelo que dizem os outros homens, não seria necessário entregar-se a tanto trabalho e esforço, e ninguém se sacrificaria nessa busca."

Alguém vai à beira do mar e só vê água salgada, tubarões e peixes.

Ele diz: - Onde está essa pérola de que tanto falam?

Talvez não haja pérola alguma. - Como seria possível obter a pérola simplesmente olhando o mar? Mesmo que tivesse de esvaziar o mar cem mil vezes com uma taça, a pérola jamais seria encontrada. É preciso um mergulhador para encontrá-la."

Rumi, poeta Persa do século XIII.

Resumo

ELIAS, M. E. P. (2005). Comparação Entre Modelos Empíricos e Semi-empíricos de Predição de Cobertura Móvel Celular: Estudo de Caso em Ambiente *Outdoor*. Dissertação (mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2004

Um estudo comparativo entre os principais modelos empíricos e semi-empíricos de predição de nível de sinal para comunicações móveis celulares é descrito neste trabalho. Medidas de cobertura *outdoor* em ambiente urbano foram comparadas com os resultados simulados a partir dos modelos de Okumura-Hata e Lee, Ikegami, Walfisch-Bertoni e Walfisch-Ikegami.

As medidas de potência de sinal recebido foram realizadas na cidade de Conceição das Alagoas, MG, a partir da única estação rádio-base (ERB) da cidade, operando na banda A com tecnologia AMPS/TDMA. Foi utilizada como portadora de teste o canal de controle analógico 328. As informações foram coletadas em algumas ruas da cidade, por meio de equipamento instalado em veículo, em diferentes posicionamentos em relação a ERB, de forma a se obter amostras de cobertura em diferentes cenários, seja em visada direta, em obstrução parcial ou total.

O modelo de Ikegami se mostrou apropriado para predição de níveis de sinal recebido no ambiente estudado, apresentando desvio médio 5,81 dB em relação às medidas realizadas.

Palavras-chave: Comunicações sem fio, comunicação móvel celular, modelos de predição, ambiente de cobertura outdoor, medidas de potência de sinal recebido.

Abstract

ELIAS, M. E. P. (2005). Comparison Among Empiric and Semi-empiric Models of Prediction of Cellular mobile Covering: Study of Case in Outdoor Environment. M.Sc. Dissertation – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2004

A comparative study among the main empiric and semi-empiric models of prediction of signal level for cellular mobile communications is described in this work. Measurements of covering outdoor in an urban environment were compared to the simulated results from the models of Okumura-Hata, Lee, Ikegami, Walfisch-Bertoni and Walfisch-Ikegami.

The measurements of received signal level were accomplished in some streets of the city of Conceição das Alagoas, MG, starting from the only radio base station of the city, operating in the A band with AMPS/TDMA technology. The 328-analog control channel was used as test carrier. The measurements were carried out using some equipment installed in a vehicle, in different positions in relation to the radio base station, in order to obtain covering profile in different circumstances such as line-of-sight, non line-of-sight, and partial obstruction.

The model of Ikegami was shown appropriate for prediction of the received signal levels in the studied environment, exhibiting an average deviation of 5,81 dB in relation to the accomplished measurements.

Keywords: wireless communications, mobile cellular communication system, propagation prediction model, outdoor environment, received signal power measurements.

Sumário

Resumo	<i>i</i>
Abstract	<i>ii</i>
Lista de figuras	<i>v</i>
Lista de tabelas	<i>viii</i>
Lista de siglas	<i>ix</i>
Lista de símbolos	<i>xi</i>
Capítulo 1	<i>1</i>
1.1 Introdução	<i>1</i>
1.2 Sistemas móveis celulares	<i>1</i>
1.2.1 Célula, Handoff, Roaming e Técnicas de Acesso Múltiplo.....	<i>2</i>
1.2.2 Padrões e Evolução dos Sistemas Celulares.....	<i>3</i>
1.3 Importância da Predição de Propagação nos Sistemas de Comunicação Móveis	<i>4</i>
1.3.1 Modelos de Propagação Urbanos	<i>6</i>
1.4 Objetivo da Pesquisa	<i>7</i>
1.5 Artigo Apresentado em Congresso com Base nesta Pesquisa	<i>8</i>
1.6 Organização do Texto	<i>8</i>
Capítulo 2	<i>9</i>
2.1 Introdução	<i>9</i>
2.2 Definições Básicas em um Sistema Móvel Celular	<i>10</i>
2.3 Técnicas de Múltiplo Acesso nos Sistemas Celulares	<i>12</i>
2.3.1 Acesso Múltiplo por Divisão de Frequência (FDMA).....	<i>12</i>
2.3.2 Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo (TDMA).....	<i>13</i>
2.3.3 Acesso Múltiplo por Divisão de Código (CDMA).....	<i>13</i>
2.3.4 Acesso Híbrido.....	<i>14</i>
2.4 Padrões e Evolução dos Sistemas Celulares	<i>15</i>
2.4.1 Sistemas Celulares de Primeira Geração.....	<i>16</i>
2.4.2 Sistemas Celulares de Segunda Geração.....	<i>16</i>
2.5 Sistemas Celulares de Terceira Geração	<i>17</i>
Capítulo 3	<i>20</i>
3.1 Introdução	<i>20</i>
3.1.1 Ondas Eletromagnéticas.....	<i>20</i>
3.1.2 Atenuação em Espaço Livre.....	<i>21</i>
3.1.3 Refração de Onda Eletromagnética	<i>21</i>
3.1.4 Difração de Onda Eletromagnética.....	<i>22</i>
3.1.5 Reflexão de Onda Eletromagnética	<i>23</i>
3.1.6 Desvanecimento (<i>fading</i>).....	<i>23</i>
3.2 – Ferramentas de Predição	<i>25</i>
3.2.1 Modelos de Propagação de Onda Eletromagnética Para Comunicações Móveis Celulares	<i>26</i>
3.2.1.1 Modelo de Lee	<i>30</i>

3.2.1.2 Modelo de Okumura-Hata	35
3.2.1.3 Modelo de Walfisch-Bertoni.....	39
3.2.1.3.1 Cálculo da Atenuação	43
3.2.1.3.2 Atenuação em Espaço Livre.....	43
3.2.1.3.3 Redução de $Q(\alpha)$	43
3.2.1.3.4 Efeito da difração.....	44
3.2.1.4 Modelo de Ikegami	47
3.2.1.5 Modelo de Walfisch-Ikegami.....	51
Capítulo 4.....	56
4.1 A Cidade Conceição das Alagoas, MG.....	56
4.2 Equipamentos usados e metodologia de trabalho.....	57
4.3 Resultados.....	68
Capítulo 5.....	78
5.1 Conclusões	78
Referências.....	80
Apêndice.....	84

Lista de figuras

Figura 2.1. Representação de várias células da mesma área de cobertura.....	10
Figura 2.2. Comparação entre as técnicas de acesso multiusuário usadas nos sistemas móveis celulares.....	15
Figura 3.1. Fenômeno da refração observado para ondas eletromagnéticas	21
Figura 3.2. Demonstração do encurvamento do feixe de RF para baixo, em direção ao solo	22
Figura 3.3. Contorno de obstáculos por ondas eletromagnéticas	23
Figura 3.4. Demonstração da variação do nível de potência recebida por um equipamento móvel, evidenciando o fading de Rayleigh	24
Figura 3.5. Exemplo de trajetórias usadas na determinação da potência recebida pelo móvel, por meio dos modelos determinísticos	28
Figura 3.6. Atenuações de percurso em diferentes ambientes, por meio do modelo de Lee ..	33
Figura 3.7. Cálculo da potência recebida por uma estação móvel, por meio do modelo de Lee, para diferentes condições de frequências	34
Figura 3.8. Cálculo da potência recebida por uma estação móvel, por meio do modelo de Lee, para diferentes condições de h_b	34
Figura 3.9. Cálculo da potência recebida por uma estação móvel, por meio do modelo de Lee, para diferentes condições de h_m	35
Figura 3.10. Cálculo da potência recebida por uma estação móvel, por meio do modelo de Lee, para diferentes condições de P_t	35
Figura 3.11. Cálculo da atenuação de percurso, entre ERB e móvel, por meio do modelo de Okumura-Hata (urbano), para diferentes condições de frequências	38
Figura 3.12. Cálculo da atenuação de percurso, entre ERB e móvel, por meio do modelo de Okumura-Hata (urbano), para diferentes condições de h_b	38
Figura 3.13. Cálculo da atenuação de percurso, entre ERB e móvel, por meio do modelo de Okumura-Hata (urbano), para diferentes condições de h_m	39
Figura 3.14. Caminhos possíveis para a propagação de ondas eletromagnéticas, na faixa de UHF, em ambientes construídos, usados na determinação do modelo de Walfisch-Bertoni.....	40
Figura 3.15 - Avaliação da difração de uma frente de onda plana em uma seqüência de semi-obstáculos.....	41

Figura 3.16. Cálculo da atenuação de percurso, entre ERB e móvel, por meio do modelo de Walfisch-Bertoni, para diferentes condições de frequência	45
Figura 3.17. Cálculo da atenuação de percurso, entre ERB e móvel, por meio do modelo de Walfisch-Bertoni, para diferentes condições de d	46
Figura 3.18. Cálculo da atenuação de percurso, entre ERB e móvel, por meio do modelo de Walfisch-Bertoni, para diferentes condições de H	46
Figura 3.19. Cálculo da atenuação de percurso, entre ERB e móvel, por meio do modelo de Walfisch-Bertoni, para diferentes condições de h_m	47
Figura 3.20. Cálculo da atenuação de percurso, entre ERB e móvel, por meio do modelo de Ikegami, para diferentes condições de frequência.....	48
Figura 3.21. Cálculo da atenuação de percurso, entre ERB e móvel, por meio do modelo de Ikegami, para diferentes condições de W	49
Figura 3.22. Cálculo da atenuação de percurso, entre ERB e móvel, por meio do modelo de Ikegami, para diferentes condições de φ	49
Figura 3.23. Cálculo da atenuação de percurso, entre ERB e móvel, por meio do modelo de Ikegami, para diferentes condições de h_b	50
Figura 3.24. Cálculo da atenuação de percurso, entre ERB e móvel, por meio do modelo de Ikegami, para diferentes condições de h_m	50
Figura 3.25. Cálculo da atenuação de percurso, entre ERB e móvel, por meio do modelo de Walfisch-Ikegami sem linha de visada direta (L_{PNLOS}), para diferentes condições de frequência	53
Figura 3.26. Cálculo da atenuação de percurso, entre ERB e móvel, por meio do modelo de Walfisch-Ikegami sem linha de visada direta (L_{PNLOS}), para diferentes condições de W .	53
Figura 3.27. Cálculo da atenuação de percurso, entre ERB e móvel, por meio do modelo de Walfisch-Ikegami sem linha de visada direta (L_{PNLOS}), para diferentes condições de θ ..	54
Figura 3.28. Cálculo da atenuação de percurso, entre ERB e móvel, por meio do modelo de Walfisch-Ikegami sem linha de visada direta (L_{PNLOS}), para diferentes condições de h_r ..	54
Figura 3.29. Cálculo da atenuação de percurso, entre ERB e móvel, por meio do modelo de Walfisch-Ikegami sem linha de visada direta (L_{PNLOS}), para diferentes condições de h_m ..	55
Figura 4.1. Imagens relacionadas às atividades desempenhadas em Conceição das Alagoas.....	61
Figura 4.2. Vias selecionadas para coleta de dados, por meio do veículo de teste.....	62

Figura 4.3. Exemplo de cálculo do ângulo (θ) formado entre a projeção horizontal da menor trajetória do ponto analisado à torre transmissora e o eixo da rua envolvida.....	63
Figura 4.4. Diagrama de irradiação vertical de antena onidirecional, com e sem <i>downtilt</i> elétrico	64
Figura 4.5. Diferença do ganho vertical de uma antena isotrópica em função da posição do móvel.....	65
Figura 4.6. Nível de sinal recebido pelo móvel para a rua Benedito Lima, sem considerar o ganho da antena transmissora da ERB	69
Figura 4.7. Nível de sinal recebido pelo móvel para a rua Benedito Lima, considerando o ganho da antena transmissora da ERB.....	69
Figura 4.8. Nível de sinal recebido pelo móvel para a rua Jesus Marques Prata, considerando o ganho da antena transmissora da ERB.....	70
Figura 4.9. Nível de sinal recebido pelo móvel para a rua Tupis, considerando o ganho da antena transmissora da ERB.....	70
Figura 4.10. Nível de sinal recebido pelo móvel para a rua da Saudade, considerando o ganho da antena transmissora da ERB	71
Figura 4.11. Comportamento do desvio padrão médio global porcentual para as medidas feitas nas ruas.....	73
Figura 4.12. Comportamento gráfico do desvio global em dB.....	73
Figura 4.13. Interpolação dos valores de potência recebida, coletados na rua Benedito Lima	75
Figura 4.14. Interpolação dos valores de potência recebida, coletados na rua Jesus Marques Prata	75
Figura 4.15. Interpolação dos valores de potência recebida, coletados na rua Tupis.....	76
Figura 4.16. Interpolação dos valores de potência recebida, coletados na rua Saudade.....	76
Figura 7.1. Nível de sinal recebido pelo móvel para a rua Jesus Marques Prata, sem considerar o ganho da antena transmissora da ERB	84
Figura 7.2. Nível de sinal recebido pelo móvel para a rua Tupis, sem considerar o ganho da antena transmissora da ERB	85
Figura 7.3. Nível de sinal recebido pelo móvel para a rua Saudade, sem considerar o ganho da antena transmissora da ERB.....	85

Lista de tabelas

Tabela 3.1. Condições iniciais usadas na obtenção do modelo de Lee.....	31
Tabela 3.2. Parâmetros γ e P_{ro} , obtidos por meio de medições de campo, para diferentes condições de morfologia	32
Tabela 3.3. Parâmetros usados no modelo de Okumura-Hata.....	37
Tabela 3.4. Classificação dos ambientes móveis celulares	37
Tabela 3.5. Condições para cálculo de L_{θ}	51
Tabela 3.6. Condições para cálculo dos coeficientes K_{θ} , K_a , K_d e K_f	52
Tabela 4.1. Equipamentos usados nas medições de campo.....	58
Tabela 4.2. Informações obtidas a partir do projeto da estação (módulo C).....	59
Tabela 4.3. Resultado das medições com o equipamento HP 8921A.....	59
Tabela 4.4. Tabela gerada pelo equipamento RSAT 2000 (CTBC Celular), durante coleta de dados referente à cobertura do canal 328.....	62
Tabela 4.5. Parâmetros medidos, usados nos demais modelos.....	64
Tabela 4.6. Características de ganho (dBd) versus ângulo de elevação da antena BCD 80010.....	66
Tabela 4.7. Desvio padrão médio percentual para as medidas feitas na rua Benedito Lima ..	71
Tabela 4.8. Desvio médio, em dB, para as medidas feitas na rua Benedito Lima.....	71
Tabela 4.9. Desvio padrão médio percentual para as medidas feitas na rua Jesus M. Prata...	72
Tabela 4.10. Desvio médio, em dB, para as medidas feitas na rua Jesus M. Prata	72
Tabela 4.11. Desvio padrão médio percentual para as medidas feitas na rua Tupis	72
Tabela 4.12. Desvio médio, em dB, para as medidas feitas na rua Tupis.....	72
Tabela 4.13. Desvio padrão médio percentual para as medidas feitas na rua Saudade	72
Tabela 4.14. Desvio médio, em dB, para as medidas feitas na rua Saudade.....	72
Tabela 4.15. Análise global dos desvios padrão	72
Tabela 4.16. Análise global dos desvios, em dB	73
Tabela 5.1. Avaliação dos modelos estudados, para o ambiente de Conceição das Alagoas .	78

Lista de siglas

ERB	Estação rádio-base
CCC	Central de comutação e controle
FDMA	<i>Frequency division multiple access</i>
TDMA	<i>Time division multiple access</i>
CDMA	<i>Code division multiple access</i>
NMT	<i>Nordic mobile telephone</i>
AMPS	<i>Advanced mobile phone system</i>
GSM	<i>Global system for mobile communications</i>
PDC	<i>Personal digital cellular</i>
3G	Sistemas móveis celulares de terceira geração
IMT-2000	<i>International mobile communications 2000</i>
WCDMA	<i>Wideband CDMA</i>
CDMA-2000	Proposta de padronização, da empresa Qualcomm, para redes 3G
2G	Sistemas móveis celulares de segunda geração
2,5G	Sistemas móveis celulares de geração 2,5 (intermediária entre os sistemas 2G e 3G)
GPRS	<i>General packed radio system</i>
EDGE	<i>Enhanced digital for global evolution</i>
CDMA 1XRTT	<i>1X radio transmission technology CDMA</i>
ARPU	<i>Average revenue per user</i>
SMS	<i>Short message service</i>
MMS	<i>Multimedia message service</i>
<i>e-commerce</i>	Comércio eletrônico (<i>eletronic commerce</i>)
WLAN	<i>Wireless local area network</i>
BER	Taxa de erro de bit (<i>bit error rate</i>)
3D	Três dimensões
dBd	Ganho, em dB, em relação à antena dipolo
C/I	Relação <i>carrier to interference</i>
TLDN	<i>Temporary local directory number</i>
MAHO	<i>Mobile assistant of handoff</i>
TACS	<i>Total access cellular system</i>
J-TACS	Adaptação do padrão TACS usado no Japão
C450	Sistema celular de primeira geração, usado na Alemanha
FM	Modulação em frequência (<i>frequency modulation</i>)
FSK	Modulação por chaveamento de frequência (<i>Frequency shift keying</i>)
W	Watts
km	quilômetro
DCS-1800	Digital cellular system – 1800
PCS 1900	Personal communication system – 1900
IS-54	<i>International standard</i> – 54
IS-136	<i>International standard</i> – 136
D-AMPS	Digital AMPS
IS-95	<i>International standard</i> – 95
RDSI	Rede digital de serviços integrados
kHz	quilohertz
DQPSK	<i>Differential quadrature phase shift keying</i>
MHz	megahertz

bps	Bits por segundo
ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute</i>
UMTS	<i>Universal mobile telecommunications system</i>
SMG	<i>Special mobile group</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
Mbps	megabits por segundo
Kbps	quilobits por segundo
4G	Sistemas móveis celulares de quarta geração
IP	Internet protocol
RF	Radiofrequência
GTD	<i>Geometrical theory of diffraction</i>
UTD	<i>Uniform theory of diffraction</i>
CAD	<i>Computer aided design</i>
2D	Dois dimensões
BSP	<i>Binary space partitioning algorithm</i>
FDTD	<i>Finite difference time domain</i>
LOS	<i>Line of sight</i> – visada direta
NLOS	<i>Non line of sight</i> – Ausência de visada direta
GPS	<i>Global positioning system</i> – sistema de posicionamento global
AABB	Associação Atlética Banco do Brasil
RBS 882	<i>Radio base system 882</i>
HP	Hewlett Packard
CTBC	Companhia de Telecomunicações do Brasil Central
VSWR	<i>Voltage stationary wave ratio</i> – taxa de onda estacionária de tensão
dBm	Representação de potência, na escala logarítmica, em referência a 1 miliwatt (1 mW)

Lista de símbolos

N	Fator de reuso de frequências
D	Distância mínima entre 2 células que usam os mesmos canais (mesmas frequências)
R	Raio da célula
\vec{E}	Vetor campo elétrico
\vec{B}	Vetor densidade de fluxo magnético
\vec{H}	Vetor campo magnético
\vec{D}	Vetor densidade de fluxo elétrico
\vec{J}	Vetor densidade de corrente
n_1	Índice de refração do meio 1
P_r	Nível de potência teórico recebido pelo móvel
P_{ro}	Nível de potência existente a 1,6 km (1 milha) do ponto de transmissão
r	Distância entre a ERB e a estação móvel
r_o	Distância de referência: 1 (dada em milhas) ou 1,6 (dada em km)
γ	Taxa de variação da atenuação com a distância
f	Frequência
f_0	Frequência de referência para o modelo de Lee (900 MHz)
α_o	Fator de ajuste para o modelo de Lee para condições diversas de altura da antena transmissora da ERB, altura da antena do móvel, frequência, potência transmitida e ganhos das antenas transmissora e receptora
n	Fator de ajuste para o modelo de Lee, dado em dB/década
$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ e α_5	Coefficientes necessários à obtenção de α_o
P_t	Potência transmitida pela ERB
P_r	Potência média recebida pelo móvel
h_b, h_m	Alturas das antenas da ERB e do móvel
g_1, g_2	Ganhos das antenas da ERB e do móvel
P_0	Potência recebida pelo móvel associada à onda eletromagnética propagando pelo espaço livre
L_0	Atenuação em espaço livre
$A_m(f, d)$	Atenuação média relativa à propagação das ondas eletromagnéticas em um ambiente urbano, para o modelo de Okumura-Hata
$H_b(h_b, d)$	Fator de ajuste, considerado no modelo de Okumura-Hata, para altura do sistema de antenas da ERB diferente do valor de referência
$H_m(h_m, f)$	Fator de ajuste, considerado no modelo de Okumura-Hata, para alturas de antena da estação móvel diferentes do valor de referência
$K_{so}, K_{ter}, K_{sp}, K_{is}$	Fatores de correção das características do terreno para o modelo de Okumura-Hata
L_p	Atenuação média de percurso
$a(h_m)$	Coefficiente usado no cálculo do modelo de Okumura-Hata
C_0, C_1 e C_2	Parâmetros dependentes da frequência, usados no modelo de Okumura-Hata
d	Distância entre obstáculos
R_e	Raio efetivo da terra ($8,5 \times 10^3$ km)

R	Distância entre a ERB e a construção mais próxima ao móvel, entre a ERB e o móvel
H	Diferença, em metros, entre a altura do sistema irradiante da ERB e o topo das construções
h	Altura das construções
α	Ângulo entre a horizontal e a direção de propagação no modelo de Walfisch-Bertoni
L_{ex}	Atenuação excedente, devido ao ambiente urbano
A	Coefficiente devido à geometria das construções
W	Largura da rua onde o móvel está localizado (metros)
φ	Ângulo entre o eixo da rua na qual o móvel está localizado e a projeção horizontal da menor trajetória entre a ERB e o móvel, usado no modelo de Ikegami
lr	Parâmetro relativo ao coeficiente de reflexão das paredes das construções, usado no modelo de Ikegami
$L(diff)$	Atenuação do sinal devido à difração do mesmo no topo das construções próximas ao móvel
$L(mult)$	Atenuação devido à múltipla difração nas construções anteriores
L_{θ}	Atenuação devido ao ângulo de elevação θ (modelo de Walfisch-Ikegami)
K_0, K_a, K_d e K_f	Coefficientes calculados a partir da altura da ERB, da altura do móvel e da frequência de operação
P_{ERP}	Potência efetivamente irradiada pela antena, em dBm
$G_{ant(p)}$	Ganho da antena transmissora, em relação ao ponto analisado, em dBd
L_{meio}	Atenuação provocada pelo meio de transmissão
$L_{conectores}$	Atenuação devido aos conectores
L_{FEEDER}	Atenuação causada pelo cabo alimentador das antenas
$L_{rab.ant}$	Atenuação causada pelo trecho de cabo (rabicho) usado na conexão entre o cabo alimentador e a antena
dB	Decibel

Capítulo 1

1.1 Introdução

Dentre as várias descobertas científicas, ocupa posição de destaque a descoberta da composição da luz branca, por Sir Isaac Newton, em 1680. As experiências com a luz resultaram em várias outras descobertas, dentre as quais podemos citar o sistema de impressões digitais (*fingerprint*), desenvolvido por Herschel em 1880; a descoberta do raio X, por Roentgen em 1895; dos raios gama, por Rutherford, em 1900 e da fibra óptica comercial por volta de 1970 [1]. Ocupa posição de destaque nesta lista as teorias de Maxwell sobre a propagação de ondas eletromagnéticas e sua comprovação por Hertz. Teve muito impacto também o desenvolvimento do rádio, por Marconi, por meio de sua famosa experiência, na qual demonstrou que por meio de ondas de rádio seria possível estabelecer contato entre navios em alto mar e o continente [2]. Mais tarde, este fato veio revolucionar os sistemas de comunicação, proporcionando a transmissão de informações sem a necessidade de um meio físico para confinamento. Estas descobertas foram, sem dúvida alguma, o ponto de partida para as atuais redes de comunicação sem fio.

1.2 Sistemas móveis celulares

O desejo de se comunicar em movimento com total liberdade, sem a necessidade de uma infra-estrutura baseada em um ponto fixo de acesso à rede de comunicação (centrais fixas, redes físicas de acesso), seduz o ser humano desde o surgimento dos sistemas de telecomunicações. Estas idéias, aliadas ao desenvolvimento da ciência e das técnicas de modulação e transmissão via rádio, deram origem às primeiras pesquisas, no início do século

XX, que proporcionaram o desenvolvimento de sistemas de comunicações nos quais o acesso final ao usuário não dependia de meio para confinamento, culminando com o surgimento dos atuais padrões para sistemas de comunicações móveis celulares.

As vantagens dos sistemas celulares são a possibilidade de comunicação em qualquer lugar— desde que a tecnologia permita, a agilidade na tomada de decisões— poderosa ferramenta de trabalho e, recentemente, a transmissão de dados em banda larga.

Como desvantagens técnicas podemos enumerar a incompatibilidade que existe entre alguns sistemas (bases tecnológicas diferenciadas) e problemas inerentes à cobertura, como áreas de sombra (*shadowing effect*) e interferências.

1.2.1 Célula, Handoff, Roaming e Técnicas de Acesso Múltiplo

A operacionalização dos sistemas celulares não seria possível sem o conceito de célula, feito por D.H. Ring (do *Bell Labs*) [16], que idealizou o reuso de frequências, associado às estações rádio-base (ERB), em regiões suficientemente espaçadas. Segundo este conceito, ERBs distintas poderiam usar as mesmas frequências para se comunicarem com aparelhos móveis, desde que os níveis de interferência entre as estações esteja dentro de padrões pré-estabelecidos, de forma que não haja degradação da qualidade do sinal [1].

Outra característica marcante dos sistemas móveis celulares é a manutenção da conexão iniciada por um aparelho móvel em um determinado ponto de cobertura da rede (sob a ação de uma ERB) ao se deslocar para a região de cobertura de outra ERB. Este processo, gerenciado pela central de comutação e controle (CCC) e auxiliado pelo móvel (em algumas tecnologias digitais), recebe o nome de *handoff*. O processo consiste essencialmente na troca de canal pelo móvel, quando este passa da área de cobertura de uma célula para outra adjacente. O canal pode ser constituído de um par de portadoras ou mesmo códigos associados, dependendo da tecnologia.

O *roaming* é outra particularidade dos sistemas celulares que garante a capacidade de operação— originar e receber chamadas— de um aparelho móvel, em áreas de cobertura de outras operadoras.

Os primeiros sistemas celulares— as primeiras operadoras de banda A no Brasil, por exemplo— usavam um procedimento de registro manual dos aparelhos visitantes, conhecido

por *roaming* manual. Atualmente este procedimento é automático e se deve ao crescimento da rede de sinalização entre as CCCs.

Devido à necessidade de compartilhamento de recursos (canalização), inerente aos sistemas móveis, e visando à necessidade de aumento na capacidade de escoamento de tráfego, algumas técnicas de múltiplo acesso são usadas. Desta forma é possível que o mesmo canal de comunicação entre o aparelho móvel e a ERB seja utilizado por mais de um usuário. Basicamente, nos sistemas celulares são usadas as seguintes técnicas de acesso múltiplo [3]: Acesso múltiplo por divisão de frequência (FDMA— *frequency division multiple access*), usada nos primeiros sistemas analógicos; acesso múltiplo por divisão de tempo (TDMA— *time division multiple access*) e acesso múltiplo por divisão de código (CDMA— *code division multiple access*). Por sua vez, as operadoras de telefonia celular, fazem uso de técnicas híbridas (FDMA/TDMA, FDMA/CDMA) para melhor aproveitar a capacidade da faixa de frequências adquirida [3].

1.2.2 Padrões e Evolução dos Sistemas Celulares

A primeira geração de sistemas móveis celulares apareceu por volta de 1980 e era baseada em tecnologia e sistemas analógicos, utilizando modulação em frequência (FM). Podem ser citados como exemplo destes sistemas o *nordic mobile telephone* (NMT) e o *advanced mobile phone system* (AMPS).

No início da década de 90 surgiu a segunda geração de sistemas celulares, apresentando como característica marcante o surgimento do padrão digital. Exemplos destes sistemas são o *global system for mobile communications* (GSM), inicialmente *groupe special mobile*, originário da Europa, TDMA e CDMA nos Estados Unidos da América e *personal digital cellular* (PDC), no Japão [2].

Atualmente, fabricantes, operadoras e órgãos governamentais de várias regiões do mundo somam esforços para a definição dos padrões da terceira geração (3G) de sistemas celulares. Os sistemas 3G deverão proporcionar ao usuário vários serviços digitais em banda larga, possibilitando a convergência entre as redes de comunicação móveis e a Internet. Os sistemas 3G deverão seguir os padrões técnicos— como taxas mínimas de transmissão *versus* mobilidade, técnicas de múltiplo acesso e largura de faixa do canal, entre outros— definidos por uma comissão criada dentro do ITU-T, denominada *International Mobile*

Communications 2000 (IMT-2000) [4]. Dentre os possíveis padrões definidos pelo IMT-2000 para os sistemas 3G destacam-se o *wideband* CDMA (WCDMA) e o CDMA-2000. A migração dos sistemas 2G para as redes móveis 3G pode ser efetuada por meio de atualização intermediária dos sistemas 2G, devido a questões técnicas, econômicas e mercadológicas, envolvendo fabricantes e operadores de serviço móvel. Este estágio entre as redes 2G e 3G recebe o nome de “geração 2,5G” e nada mais é do que uma evolução dos atuais padrões de redes celulares digitais, visando uma transição mais suave à terceira geração, em todos os níveis do sistema. Exemplo de sistemas 2,5G são o *general packet radio system* (GPRS), uma evolução natural do padrão GSM, o sistema *enhanced digital for global evolution* (EDGE), uma possível evolução dos padrões TDMA e GSM e o *1X radio transmission technology* CDMA (CDMA 1XRTT), para os sistemas CDMA [5].

1.3 Importância da Predição de Propagação nos Sistemas de Comunicação Móveis

Existe uma tendência para a convergência entre os sistemas de comunicação móveis e as atuais redes digitais, com o intuito de prover o sistema do usuário final de serviços em banda larga desvinculados de pontos fixos de acesso, como é feito hoje em dia. Esta tendência se confirma em análises técnicas e mercadológicas para os próximos anos, que indicam declínio na porção da receita média por usuário (ARPU— *average revenue per user*) destinada ao tráfego de voz e conseqüente incremento da parcela relativa aos serviços baseados em pacotes de dados, como mensagens de texto (SMS— *short message service*), vídeo (MMS— *multimedia message service*), comércio eletrônico (*e-commerce*) e internet, entre outros [6]. Infelizmente, os recursos financeiros necessários à criação desta nova e poderosa estrutura móvel de comunicação são consideráveis. Entretanto, tais investimentos poderiam ser minimizados por meio do compartilhamento de infra-estrutura (*sites*, meio de transmissão, etc) entre as operadoras [7]. Além disso, redes celulares compatíveis com serviços de comunicação de dados podem abrir novas perspectivas no segmento corporativo. Um exemplo é a compatibilidade com redes de computadores locais sem fio, conhecidas como *wireless local area network* (WLAN). Em regiões de interesse, como aeroportos e em empresas que tenham redes corporativas e necessitem disponibilizar informações para

usuários em trânsito, mesmo fora delas, a conectividade entre WLANs e redes celulares 2,5G e 3G se mostra uma boa alternativa [8].

Devido à limitação de uso no espectro eletromagnético e à necessidade de maior largura de banda, a migração para os sistemas de terceira geração implica na utilização de portadoras em frequências mais elevadas. Com elas (menores comprimentos de onda) [9], acentuam-se os problemas de propagação de ondas eletromagnéticas, como difração, atenuação em espaço livre, devido à penetração em estruturas físicas, áreas de sombra. Como consequência, pode-se prever uma redução do nível de potência recebida pelos aparelhos móveis, quando comparado com a cobertura das atuais operadoras, fato que contribui para o aumento da taxa de erro de bit (BER) nas transmissões digitais. Neste contexto, para as futuras redes móveis, esperam-se maiores dificuldades em relação à qualidade do serviço prestado, mediante o cenário adverso.

Uma vez que a competição entre empresas prestadoras de serviço móvel tende a se tornar mais acirrada, uma cobertura bem dimensionada, que atenda às necessidades dos usuários, pode se constituir em diferencial no que se refere à oferta de novos serviços aos atuais e futuros clientes. Para atender a esta nova tendência dos sistemas móveis, novos dispositivos e componentes que operem em frequências elevadas e suportem as exigências das transmissões digitais—largura de banda considerável, por exemplo— como antenas, circuitos integrados, assim como softwares, esquemas de modulação e codificação têm sido desenvolvidos. A estas necessidades tecnológicas, advindas dos equipamentos terminais, se soma a necessidade de ferramentas de predição mais eficientes.

As ferramentas de predição deverão basear-se em modelos de propagação mais adequados ao novo cenário que se forma diante dos futuros sistemas móveis celulares, com uso de frequências mais elevadas, associadas a ambientes de propagação *outdoor* e *indoor* mais complexos, no qual os problemas relativos à propagação urbana serão acentuados, como difração, áreas de sombra, atenuação, etc. Com isso, pode-se garantir maior precisão e segurança no dimensionamento de cobertura das redes móveis do futuro, assegurando a satisfação de operadoras e clientes.

1.3.1 Modelos de Propagação Urbanos

Durante o desenvolvimento e implementação dos sistemas celulares, vários modelos de propagação urbanos vêm sendo propostos [1], [2], [10]-[14], [51]. Alguns destes são usados em ferramentas de predição comerciais e empregadas por várias operadoras no dimensionamento de suas redes de cobertura [15]. Estes modelos são apresentados em diferentes formatos e categorias, desde modelos relativamente simples, que visam caracterizar a propagação de ondas eletromagnéticas em ambiente urbanos, de uma forma generalizada, até os atuais e complexos métodos computacionais 3D, específicos ao ambiente analisado, seja ele *outdoor* ou *indoor* [12].

Os modelos de propagação classificam-se em empíricos, semi-empíricos e determinísticos [12]. Os modelos empíricos são obtidos a partir de extenso levantamento de informações (medições) da cobertura de uma determinada região, associados a técnicas de interpolação, e usadas na obtenção das expressões que permitirão calcular a atenuação média de percurso na área em questão. Como exemplo, podem ser citados os modelos de Okumura-Hata, Lee, que são modelos empíricos obtidos a partir de extensas coletas de dados nas cidades de Tóquio [11] e algumas cidades americanas [10] e de Alsebrok [12].

Os modelos de propagação semi-empíricos são obtidos a partir de informações de cobertura de uma determinada área, provenientes de medições, associadas à teoria eletromagnética clássica, que levam em consideração fenômenos como reflexão em estruturas, refração e difração em bordas de obstáculos. Pertencem a esta classe os modelos de Walfisch-Bertoni, Ikegami e Walfisch-Ikegami, que são modelos semi-empíricos obtidos para ambientes urbanos homogêneos, que contemplam fenômenos relativos à propagação, como difração no topo de construções e reflexões, entre outros [12].

Por fim, os modelos determinísticos baseiam-se na utilização de métodos numéricos e computacionais, associados a informações digitalizadas da região a ser analisada e às teorias do eletromagnetismo e óptica física. Este tipo de modelo normalmente é usado na predição de coberturas *indoor* ou em regiões de microcélula/picocélula, dado o esforço computacional necessário. Algumas ferramentas computacionais têm sido desenvolvidas com o intuito de validar tais modelos [12].

Os atuais softwares de predição usados para cobertura *outdoor* normalmente baseiam-se em alguns modelos empíricos e semi-empíricos, de comprovada eficiência em campo, ou a uma associação destes, formando modelos híbridos proprietários. Os modelos de

Okumura-Hata, Lee e Walfisch-Ikegami são exemplo de modelos de propagação usados em tais ferramentas.

1.4 Objetivo da Pesquisa

Este trabalho tem como objetivo apresentar os principais tipos de modelos de predição de nível de sinal para comunicações móveis celulares e realizar um estudo comparativo entre alguns deles, para os quais informações medidas de cobertura *outdoor*, provenientes de um ambiente urbano, foram comparadas com os resultados simulados dos modelos de Okumura-Hata e Lee, Ikegami, Walfisch-Bertoni e Walfisch-Ikegami. As diferenças entre os resultados medidos e simulados determinam qual é o modelo de propagação que melhor se adapta às condições da região analisada. Alguns destes modelos são usados nas ferramentas de predição de grande parte das operadoras de telefonia móvel, no dimensionamento de suas redes de cobertura.

Os testes de coleta das informações de cobertura foram realizados em uma região plana, residencial, constituída de edificações baixas (máximo de 2 pavimentos), com grande regularidade no arruamento e baixa densidade de ocorrência, tipicamente suburbana (cidade de Conceição das Alagoas, MG), onde os dados da cobertura *outdoor*, proveniente da única estação da cidade, foram obtidos por meio de um veículo de teste (*drive-test*), de propriedade da operadora local de telefonia celular, operando na banda A. Durante o levantamento, foi usada como portadora de teste o canal de controle analógico 328, alocado à ERB local, que utiliza a tecnologia *dual mode* AMPS/ TDMA. As informações foram coletadas em algumas ruas da cidade, em diferentes posicionamentos em relação à ERB, de forma a se obter amostras de cobertura em diferentes cenários, seja em visada direta, obstrução parcial ou total. No cálculo do nível de sinal teórico recebido pelo equipamento móvel foi usado o ganho da antena transmissora presente na ERB, na direção do móvel, em cada ponto analisado. Para tal, informações relativas ao diagrama de irradiação da antena, como ganho (em dBd) em função da direção angular em relação à linha de horizonte da antena, obtidas a partir de dados fornecidos pelo fabricante das antenas, possibilitaram a inclusão a sua inclusão nas simulações. O ganho da antena externa, existente no equipamento de coleta presente no veículo de teste não foi considerado.

1.5 Artigo Apresentado em Congresso com Base nesta Pesquisa

Com base nos resultados desta pesquisa foi apresentado um artigo em congresso nacional, a saber: Marcelo E.P. Elias e Amílcar C. César, *Comparação Entre Modelos Empíricos e Semi-empíricos de Predição de Cobertura Móvel Celular: Estudo de Caso em Ambiente Urbano*, XXI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações-SBT'04, pp. 1-6 (CD-ROM), Belém, PA, 6 a 9 de setembro de 2004.

1.6 Organização do Texto

O texto está organizado da seguinte maneira. No Capítulo 2 são abordadas as principais características dos sistemas móveis celulares; conceitos básicos de células, interferência, *handoff*, *roaming* e técnicas de acesso ao meio, além de uma descrição mais detalhada sobre os atuais padrões das redes celulares. No Capítulo 3 são apresentados os principais conceitos sobre propagação de ondas eletromagnéticas em espaço livre, assim como uma descrição das características dos ambientes de propagação móvel, mostrando as diferenças em relação ao espaço livre. Neste capítulo também são apresentados os conceitos, classificação e os modelos de propagação, além de uma descrição do ambiente analisado e dos equipamentos usados no levantamento da cobertura *outdoor*. No Capítulo 4 são apresentados os resultados provenientes da comparação entre os dados obtidos no teste de campo e a simulação dos modelos estudados, seguidos de comentários. O Capítulo 5 trata das conclusões sobre a pesquisa realizada.

Capítulo 2

Sistemas de Comunicação Sem Fio

2.1 Introdução

A característica marcante dos sistemas móveis celulares é permitir ao usuário mobilidade durante a comunicação, sem a necessidade de estar vinculado a um ponto fixo de acesso à rede telefônica. Tal flexibilidade é assegurada pela utilização de um canal de radiofrequência no acesso final ao usuário. Os primeiros sistemas de comunicação móvel tinham como base uma estrutura de acesso final ao usuário na qual o espectro de frequências alocado à aplicação móvel era dividido em sub-bandas, denominadas canais. Estas portadoras e suas respectivas larguras de faixa são o meio de conexão entre a estação móvel terminal e a central de recepção.

Nos primeiros sistemas, toda a capacidade do sistema era alocada para o serviço na mesma região, operando com potências de transmissão elevadas e, conseqüentemente, áreas de coberturas muito extensas.

Devido ao grande sucesso da tecnologia e respectivos serviços, a questão passou a ser como atender a crescente demanda, uma vez que existiam limitações de espectro e conseqüentemente, de número de canais. Além do mais, as potências envolvidas na transmissão/recepção de sinais era alta (em função da área coberta), inviabilizando a implementação de transmissores móveis pequenos. Pensando nisso, D.H. Ring (do *Bell Labs*), criou em 1947 o conceito celular, que forneceu a solução para os principais problemas encontrados nos sistemas de rádio móvel [16]. O problema da limitação do espectro foi solucionado pela diminuição da área de cobertura de cada estação, reduzindo a potência e uso de antenas adequadas. Com isso, foi possível reutilizar a mesma faixa de frequências (mesmos canais), desde que determinada distância entre as estações detentoras dos mesmos canais seja garantida. Desta forma, uma interferência mútua mínima entre elas é garantida. É a relação *carrier to interference* (C/I), análoga à relação sinal-ruído.

2.2 Definições Básicas em um Sistema Móvel Celular

O desenvolvimento e operacionalização dos sistemas celulares não seriam possíveis sem o desenvolvimento do conceito de célula. A Fig. 2.2 mostra o esquema de uma região coberta por mais de uma célula.

Existem padrões definidos para a reutilização de frequências, sendo designados pelo fator de reuso de cada um, representado por N . Os fatores de reuso mais utilizados são $N = 3, 4, 7, 9$ e 12 . Por exemplo, utilizar um fator de reuso $N = 7$ significa dividir toda a canalização disponível para o serviço móvel entre 7 células, de forma que não exista repetição de canais entre elas. A estrutura formada pelo agrupamento destas células, na qual não existe repetição de canais recebe o nome de *cluster* (aglomerado) [37]. Toda rede de cobertura celular tem como base um *cluster* fundamental, normalmente localizado na região central das cidades. O aumento da demanda e do número de estações acarreta um aumento do número de *clusters* para a região em questão, como pode ser visto na Fig. 2.1. A capacidade de um sistema celular é diretamente proporcional ao número de vezes que o cluster é replicado em uma determinada área de serviço [37].

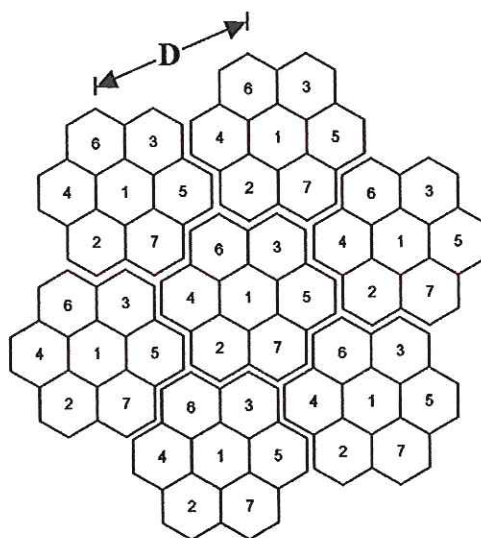


Figura 2.1. Representação de várias células da mesma área de cobertura, mostrando fator de reuso $N = 7$, *clusters* e distância teórica de reuso.

No Brasil, a maioria das operadoras de banda A que optaram pela tecnologia TDMA adotam o fator de reuso $N = 7$. A distância mínima teórica entre duas células que utilizem a mesma canalização pode ser calculada por [1]

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

na qual D é a distância mínima entre 2 células que usam os mesmos canais, R é o raio médio da célula e N é o fator de reuso envolvido.

A utilização racional do espectro disponível aos sistemas celulares, visando aumento de capacidade dentro de limites aceitáveis de interferência, exige estratégias eficientes de distribuição dos canais pela área de serviço. Basicamente, existem duas estratégias para alocação de canais: A alocação fixa e a alocação dinâmica [37]. Na alocação fixa, cada célula recebe um número pré-determinado de canais de voz, sendo que a cada nova tentativa de chamada, o usuário recebe um canal desocupado da célula melhor servidora. Para o caso de ocupação de todos os canais, as novas tentativas de chamadas não serão completadas. Altas taxas de bloqueio de ligação podem existir neste método, caso a quantidade de canais alocada nas células seja insuficiente para suportar o tráfego exigido. Na alocação dinâmica, não existe uma definição prévia dos canais pertencentes a cada célula. Para cada nova tentativa de ligação, a ERB solicita à CCC o canal de voz a ser disponibilizado. Esta, mediante a execução de algoritmos que analisam a probabilidade de bloqueio de canais dentro da célula, distância segura de reuso, níveis de interferência cocanal, além de outros parâmetros, fornece à ERB o canal a ser usado [37]. Apesar do considerável aumento da carga de processamento na CCC, neste método observa-se grande redução nos índices de degradação da qualidade das ligações devido à interferências, além de existir redução considerável da taxa de chamadas não completadas por indisponibilidade de canais [37].

Sem dúvida, a característica mais importante dos sistemas celulares é a mobilidade. Esta facilidade assegura que uma chamada originada ou recebida em qualquer lugar dentro de uma região detentora de cobertura— ou área de serviço— apresente continuidade, mesmo estando o usuário em movimento. Este serviço é garantido pela existência de duas funcionalidades especiais nas CCCs das redes móveis: O *handoff* e o *roaming*.

O *handoff* é um processo totalmente gerenciado pela CCC e auxiliado pelo móvel (em algumas tecnologias digitais) no qual existe a troca de canal pelo móvel, quando este passa da área de cobertura de uma célula para outra adjacente. Como este canal pode ser um par de portadoras (no caso dos sistemas AMPS/TDMA e GSM) ou mesmo uma codificação diferenciada de informações (sistemas CDMA), esta mudança de canal pode ser a mudança de portadoras ou de codificação, entre o móvel e a nova ERB. O processo de *handoff* é complexo, constituindo-se de várias medições dos níveis de potência recebida, por parte da ERB e do móvel (caso este auxilie no *handoff*) e de intensa sinalização especial entre ERB,

CCC e equipamento móvel. Além disso, todas estas operações devem ocorrer em intervalo de tempo igual ou inferior a 200 ms, de forma a ser imperceptível ao usuário.

O *roaming* é uma outra característica presente nos sistemas celulares que garante a capacidade de operação (originar e receber chamadas) de um móvel, em áreas de cobertura de outras operadoras. Existem 2 tipos de *roaming*: O *roaming* manual e o *roaming* automático. O *roaming* manual surgiu na primeira etapa dos sistemas celulares, nos quais a rede de sinalização entre as CCCs não estava pronta. O *roaming* automático dispensa este procedimento. Tal facilidade foi garantida com a interligação entre as CCCs de todas as operadoras que compartilham de acordos técnicos e mercadológicos para tal, conhecidos como acordos de *roaming*, facilitando com isso a sinalização automática de números virtuais (TLDN— *temporary local directory number*) entre as centrais. No Brasil, dispomos atualmente de *roaming* automático em âmbito nacional, para todas as operadoras de serviço móvel celular.

2.3 Técnicas de Múltiplo Acesso nos Sistemas Celulares

Ao longo do desenvolvimento dos sistemas móveis celulares, várias técnicas de acesso multi-usuário foram propostas [3], de forma a aumentar a capacidade de tráfego. Porém, somente algumas foram utilizadas, devido às suas características e compatibilidade com as necessidades e restrições existentes. As principais técnicas de acesso usadas nas redes celulares são: Acesso múltiplo por divisão de frequência (FDMA), acesso múltiplo por divisão de tempo (TDMA), acesso múltiplo por divisão de código (CDMA) e acesso híbrido. A seguir, serão apresentadas as principais características de cada uma destas técnicas.

2.3.1 Acesso Múltiplo por Divisão de Frequência (FDMA)

Nesta técnica, a largura de faixa total disponível é subdividida em canais e, para cada usuário, é alocada uma destas subfaixas, normalmente por demanda. Geralmente, a largura de faixa de um canal FDMA é pequena. A comunicação é contínua no tempo, o que leva à necessidade de poucos bits de cabeçalho, usados com o propósito de delimitação e

sincronização de quadros, em transmissões digitais. Transmissões em caráter bidirecional (*full-duplex*) introduzem a necessidade de duplexadores, que contribuem para elevar o custo do sistema. Existe alta probabilidade de ocorrência de intermodulação, uma vez que vários canais compartilham o mesmo sistema irradiante (antenas e cabos) e amplificadores.

2.3.2 Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo (TDMA)

Na técnica TDMA, o espectro disponível é dividido em intervalos (*slots*) de tempo, de tal forma que cada usuário possa transmitir ou receber suas informações durante o intervalo de tempo a ele reservado, disponibilizado periodicamente, a cada quadro. Diferentemente dos sistemas FDMA, que podem acomodar tanto sinais analógicos quanto digitais, sistemas que utilizam a técnica TDMA necessitam operar somente com sinais digitais, pois a transmissão é feita em rajadas (*burst*), uniformemente espaçadas no tempo. Devido às descontinuidades na transmissão, no caso dos sistemas celulares, o processo de *handoff* se torna mais simples, pois os centros de gerenciamento da CCC podem utilizar os intervalos de tempo sem transmissão para outras finalidades como, por exemplo, receber as medições feitas pelo móvel dos níveis de sinal das ERBs adjacentes. Estas medições, por sua vez, baseiam-se em uma tabela de vizinhança recebida anteriormente por meio de sinalização especial, com o intuito de auxiliar a CCC na operação de *handoff*. Este processo é conhecido como *handoff* com assistência do móvel (MAHO— *mobile assistant of handoff*). Os intervalos de tempo podem ser alocados por demanda, para diferentes usuários, baseados em uma prioridade. Desta forma, o espectro é mais bem compartilhado, aumentando a capacidade do sistema.

2.3.3 Acesso Múltiplo por Divisão de Código (CDMA)

Neste método é utilizada a técnica de espalhamento espectral, sendo que o transceptor de cada usuário no sistema utiliza uma seqüência pseudo-aleatória (código) diferente para codificação do sinal a ser transmitido. Todos os usuários transmitem ao mesmo tempo e utilizam a mesma faixa de frequência. O receptor, por meio do processo de

correlação do sinal recebido com a seqüência usada, extrai o sinal do usuário desejado. Os sinais dos demais usuários serão tomados pelo receptor como ruído, já que foram codificados a partir de seqüências diferentes, sendo descorrelacionadas com o sinal de interesse. A técnica CDMA tem se mostrado mais eficiente que as técnicas FDMA e TDMA no que diz respeito ao número máximo de usuários atendidos [17]. Esta capacidade nos sistemas CDMA é limitada pelas interferências, ao contrário das técnicas FDMA e TDMA, limitadas pela largura de faixa disponível.

2.3.4 Acesso Híbrido

As técnicas híbridas combinam as três técnicas citadas anteriormente. São elas: FDMA/CDMA, FDMA/TDMA e TDMA/CDMA. Na técnica híbrida FDMA/TDMA, o espectro disponível é dividido em subfaixas, nas quais cada uma transporta a comunicação de um determinado número de usuários que compartilham essas subfaixas em instantes de tempo distintos. Na técnica FDMA/CDMA, o espectro disponível é dividido em sub-faixas, onde cada uma transporta a comunicação de um determinado número de usuários que compartilham essa sub-faixa ao mesmo tempo, porém utilizando seqüências pseudo-aleatórias distintas. Na técnica híbrida TDMA/CDMA, cada célula utiliza uma seqüência pseudo-aleatória comum, sendo que em uma determinada célula, a cada usuário é alocado um instante de tempo distinto dos demais. No Brasil, grande parte das operadoras de serviços móveis das bandas A e B utilizam as técnicas híbridas FDMA/TDMA e FDMA/CDMA, associadas a terminais *dual mode* (AMPS/TDMA e AMPS/CDMA) para viabilizar *roaming* entre operadoras que optaram por tecnologias digitais diferentes. Com isso, foi possível oferecer cobertura em âmbito nacional aos usuários destas operadoras. A Fig. 2.2 mostra uma comparação entre as técnicas de acesso.

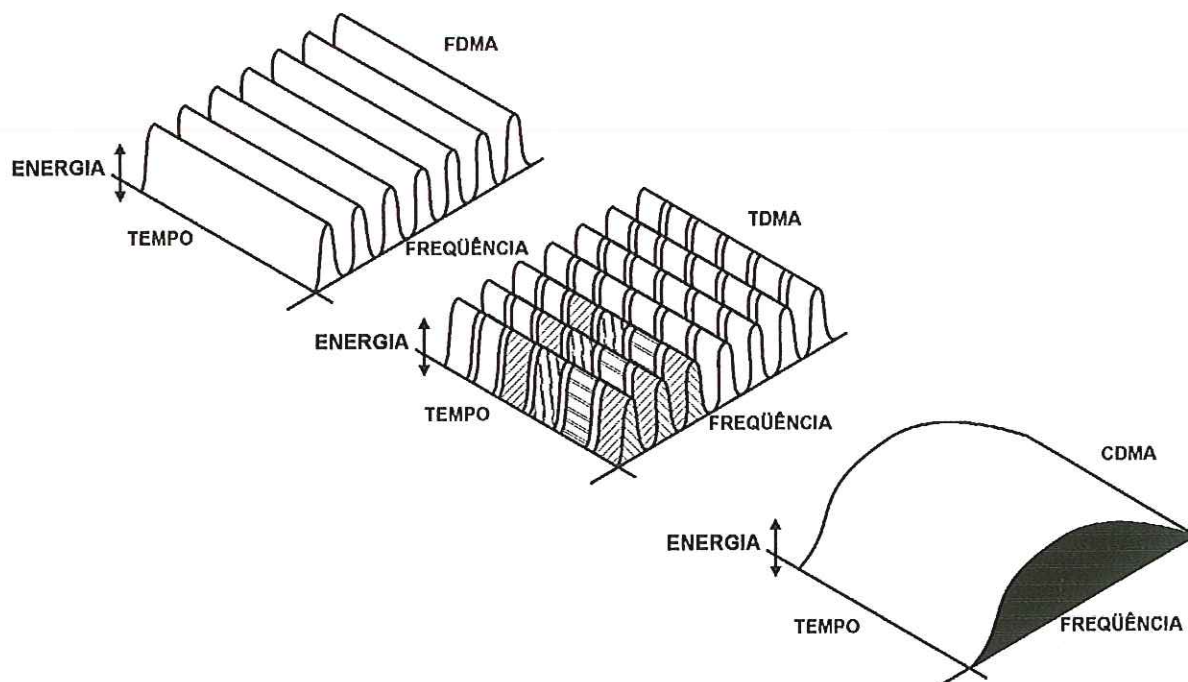


Figura 2.2. Comparação entre as técnicas de acesso multiusuário usadas nos sistemas móveis celulares.

2.4 Padrões e Evolução dos Sistemas Celulares

Desde o surgimento dos sistemas de comunicação móvel, baseados em canais de rádio interligando o equipamento móvel a uma estação de recepção, padrões diferentes foram desenvolvidos em vários países, dando origem aos atuais padrões para telefonia móvel celular. Apesar da busca constante pela padronização ou pela operabilidade entre estes sistemas, é grande o número de sistemas existentes. A rápida evolução tecnológica e o surgimento a cada dia de novas necessidades de comunicação são os principais responsáveis por este fato. Com relação à evolução tecnológica e cronológica, podemos dividir os sistemas celulares em sistemas de primeira geração, sistemas de segunda geração e em fase de desenvolvimento, os sistemas de terceira geração. Descrição destes sistemas é feita a seguir.

2.4.1 Sistemas Celulares de Primeira Geração

Os primeiros sistemas móveis celulares, que surgiram na década de 80, são considerados os sistemas de primeira geração. Estes, por sua vez, foram essencialmente analógicos. São eles o AMPS; NMT; *total access celular system* (TACS), uma adaptação do padrão AMPS e usado na Inglaterra; J-TACS, uma adaptação do padrão TACS e usado no Japão e C450, na Alemanha ocidental. As características básicas comuns a estes sistemas são: Modulação analógica (FM); sinalização feita por meio de modulação FSK; técnica de acesso FDMA; células com tamanho entre 0,5 a 10 km e potências de emissão do aparelho móvel entre 0,6 W a 10 W.

2.4.2 Sistemas Celulares de Segunda Geração

Os sistemas de segunda geração são marcados pela introdução da tecnologia digital às comunicações celulares. Dentre eles destacam-se os padrões GSM, DCS-1800, PCS-1900, IS-54 D-AMPS/ IS 136 e CDMA IS-95 [3]. O sistema GSM foi desenvolvido com o objetivo de solucionar os problemas advindos da fragmentação de várias tecnologias dos primeiros sistemas celulares da Europa. Sendo uma região com intensa atividade turística, a Europa dispunha, antes do GSM, de vários padrões para telefonia móvel, sem conectividade entre eles. Devido a esta limitação, surgiu a idéia de um padrão único, que proporcionasse uma série de serviços por meio da utilização de uma rede digital de serviços integrados (RDSI). Seu lançamento comercial foi feito em 1991 e, desde então, vários países da América do sul, Ásia e Austrália têm adotado o mesmo padrão ou sistemas equivalentes. Os padrões DCS 1800 e PCS 1900 são baseados na arquitetura de rede dos sistemas GSM, sendo que o PCS 1900 é o equivalente nos EUA do padrão GSM. O padrão IS-54, conhecido como D-AMPS (digital AMPS) é o equivalente digital do sistema analógico AMPS. No sistema D-AMPS cada canal de 30 KHz é compartilhado por três usuários, em intervalos de tempo distintos. Comparado ao sistema AMPS, a capacidade do D-AMPS é o triplo. A principal motivação para o desenvolvimento deste sistema foi a possibilidade de transição suave da tecnologia analógica para a digital, ocupando a mesma faixa de frequências. Uma recente variação do padrão IS-54, o IS-136 (anteriormente IS-54 Rev.C), exhibe as mesmas

características do IS-54, diferenciando no tipo de modulação usada para o canal de controle ($\pi/4$ DQPSK), de forma a elevar a taxa máxima de transmissão para oferecer serviços adicionais, como *paging* e envio de mensagens curtas (SMS). O padrão IS-95, baseado em tecnologia de espalhamento espectral (acesso múltiplo CDMA), foi também desenvolvido com o objetivo de possibilitar a transição suave da tecnologia analógica para a digital. No padrão IS-95 todos os usuários utilizam a mesma faixa de frequência, mesmo aqueles usuários em células adjacentes. Cada canal ocupa 1,25 MHz (cerca de 10% da banda disponível para o padrão AMPS). Como comparação prática, no sistema AMPS, as portadoras de células adjacentes devem estar espaçadas de 270 kHz (9 canais de 30 kHz). No padrão IS-95 a taxa de transmissão do canal é variável em função das solicitações do terminal e da atividade de voz por parte do usuário. São possíveis 4 taxas de transmissão: 1200 bps, 2400 bps, 4800 bps e 9600 bps, sendo que a transmissão ocorre em rajadas de 9600 bps em cada quadro (*frame*). A cada vez que a taxa é reduzida em função da atividade de voz, são gerados intervalos de tempo durante os quais a potência de transmissão do terminal móvel é reduzida de, no mínimo, 20 dB em relação ao período prévio de atividade. Este procedimento reduz significativamente a quantidade de interferência no sistema, proporcionando um aumento de capacidade.

2.5 Sistemas Celulares de Terceira Geração

Com o surgimento dos sistemas celulares de segunda geração houve grande desenvolvimento e expansão dos serviços de comunicação móvel. Considere, por exemplo, a tecnologia GSM que, em agosto de 2000, contava com 372 redes operando em todo o mundo, atendendo a 361,7 milhões de usuários [18] e representando em termos percentuais, 70% dos usuários de telefonia móvel celular do mundo. No mesmo ano em que o padrão GSM foi lançado comercialmente (1991), o *European telecommunications standards institute* (ETSI) [38] iniciou estudos para a padronização da nova geração de redes de comunicação móvel. Este novo padrão foi denominado *universal mobile telecommunications system* (UMTS) [39]. Os trabalhos iniciais foram conduzidos em um comitê técnico especial, criado dentro do ETSI, denominado *special mobile group* (SMG) e, posteriormente, compartilhados com outras entidades da Europa e de outros continentes, como Ásia (Coréia e Japão) e América (EUA). É importante dizer que desde 1986, o *international*

telecommunication union (ITU) vem coordenando esforços, atuando como mediador, na definição das especificações 3G, largura de canal ou alocação de espectro [19]. Originalmente, o ITU propôs um padrão único para os sistemas de terceira geração. Entretanto, com o surgimento de inúmeras propostas vindas de diversas associações e fabricantes, além de inúmeras razões técnicas e políticas, foi criado o *international mobile telecommunications-2000* (IMT-2000), que é um conjunto de padrões propostos para os sistemas de terceira geração [18]. Oferecer um sistema de comunicação móvel capaz de suportar vários tipos de serviços é um dos principais objetivos do IMT-2000. Para servir diferentes tipos de aplicações, o ITU prevê a implementação do IMT-2000 em 2 fases. Na fase I, taxas de transmissão da ordem de 2 Mbps são previstas, enquanto que na fase II esperam-se alcançar taxas de transmissão da ordem de 20 Mbps, viabilizando outras classes de aplicações. As taxas mínimas de transmissão especificadas pelo ITU para os sistemas IMT-2000 são 144 kbps, para ambientes *outdoor* em que o usuário está se movendo em velocidades consideráveis; 386 kbps, para situações *outdoor* em que o usuário está se movendo em velocidades baixas e 2 Mbps, para situações *indoor*, com o usuário estacionado [19]. Apesar das várias propostas existentes no IMT-2000, apenas duas se mostraram atraentes para as operadoras e fabricantes, por se basearem na tecnologia de espalhamento espectral (CDMA). Atualmente, a evolução das redes 3G percorre dois caminhos comerciais distintos, no que diz respeito aos padrões para o acesso múltiplo em banda larga na interface aérea: O UMTS, definido no IMT-2000, cujo padrão de acesso múltiplo é o WCDMA e o CDMA-2000, proposta defendida pela empresa americana Qualcomm e demais fabricantes e operadores da linha CDMA.

Embora os sistemas 3G ainda estejam em fase inicial de implantação em algumas partes do mundo, com previsão de desenvolvimento pleno em 2005, já começam a ser discutidos os sistemas móveis de quarta geração (4G), que deverão proporcionar integração total as redes móveis com todas as redes baseadas em IP, permitindo dispor, no aparelho celular, de todas as funcionalidades atualmente existentes, assim como serviços futuros [2].

Deve-se dizer também que, com o aumento da demanda pelo serviço móvel celular, cresceu a preocupação em relação à exposição do ser humano à radiação eletromagnética. Verifica-se que nas faixas de frequências atribuídas aos sistemas celulares predominam, sobre os organismos vivos, o efeito térmico, ao contrário de frequências muito elevadas, onde existe predominância do efeito ionizante (radiações ionizantes).

O efeito térmico (aquecimento dos tecidos) torna-se preocupante nas situações em que as fontes irradiadoras encontram-se próximas dos usuários. Sendo assim, não se observam problemas para o homem, nos casos das ERB's cujos sistemas irradiantes estão situados no alto de torres ou postes. Com isso, é possível assegurar densidades de potência em níveis aceitáveis para o corpo humano ao nível do solo [49], [50].

Capítulo 3

Predição de Propagação de Onda Eletromagnética

3.1 Introdução

Neste capítulo, alguns conceitos sobre a propagação de ondas eletromagnéticas na atmosfera serão apresentados, de forma a facilitar a compreensão dos modelos de propagação estudados.

3.1.1 Ondas Eletromagnéticas

As relações entre campos elétricos e magnéticos variantes no tempo podem ser descritas por meio das equações rotacionais de Maxwell [20]:

$$\nabla_x \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3.1)$$

$$\nabla_x \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} \quad (3.2)$$

nas quais \vec{E} é a intensidade de campo elétrico, em V/m; \vec{B} é a densidade de fluxo magnético, em Wb/m²; \vec{H} é a intensidade de campo magnético, em A/m; \vec{D} é a densidade de fluxo elétrico, dada em C/m² e \vec{J} é a densidade de corrente, dada em A/m².

Alguns fenômenos são de especial interesse nas comunicações via rádio, pois têm impacto direto na qualidade de transmissão de sinal entre equipamentos terminais. Atenuação em espaço livre, refração, difração, reflexão, desvanecimento e absorções são características importantes das comunicações sem fio. A seguir será feita uma descrição destes fenômenos.

3.1.2 Atenuação em Espaço Livre

A potência total emitida por um elemento irradiador é espalhada pela atmosfera, distribuída em frentes de onda, de acordo com as características de emissão (diagrama de irradiação) deste. Desprezando a absorção de energia pela atmosfera, as frentes de ondas mais afastadas do emissor apresentarão densidades de potência (W/m^2) cada vez menores, devido ao aumento da área da frente de onda. Esta atenuação devido à divergência natural do sinal é conhecida como atenuação em espaço livre e ocorre principalmente devido à incoerência das fontes emissoras disponíveis (antenas), que tendem a espalhar o sinal de RF pela interface aérea [21]. A atenuação em espaço livre é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre fonte transmissora e o ponto de interesse.

3.1.3 Refração de Onda Eletromagnética

O fenômeno da refração é observado quando uma onda eletromagnética que se propaga em um meio 1 incide sobre a interface para um meio 2, cujas características são diferentes, com um determinado ângulo de incidência, conforme mostra a Fig. 3.1. Como consequência deste fenômeno, observa-se uma alteração na direção de propagação da onda eletromagnética, a partir da interface entre os meios envolvidos, sendo esta variação de direção função da relação entre os índices de refração dos meios.

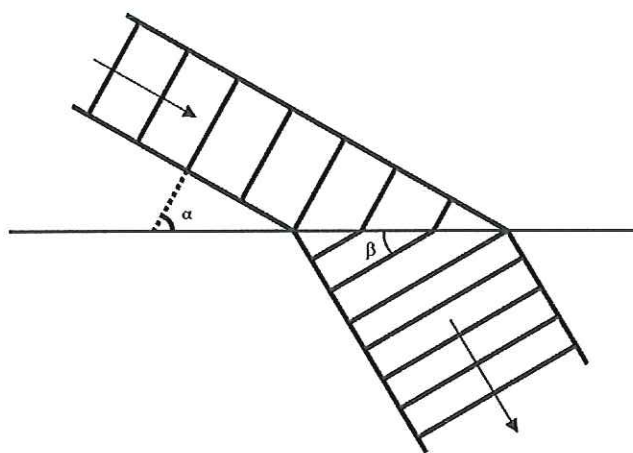


Figura 3.1. Fenômeno da refração observado para ondas eletromagnéticas.

Nas comunicações via rádio de longa distância, o fenômeno da refração resulta no desvio do feixe de RF, geralmente para baixo, em direção ao solo. Tal fato se deve à configuração da troposfera, cujo índice de refração decresce com o aumento da altitude, resultando em um perfil estratificado para esta grandeza. Este fenômeno é mostrado na Fig. 3.2.

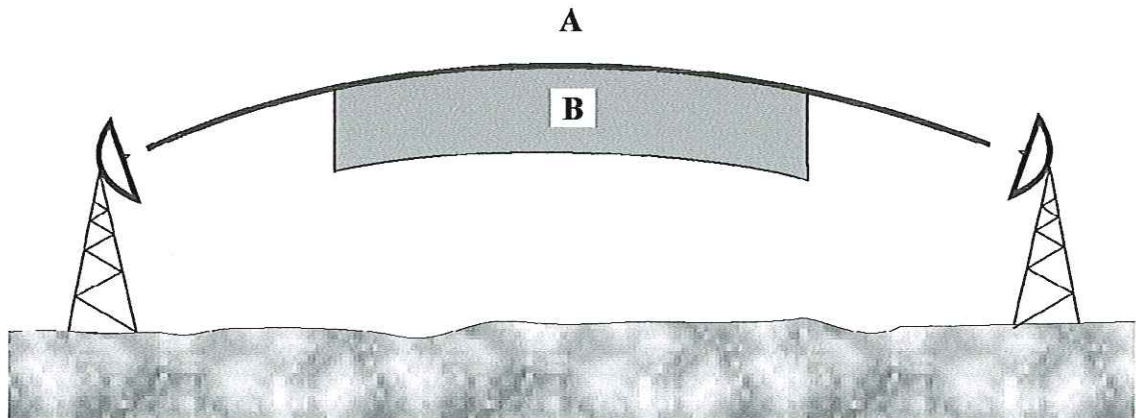


Figura 3.2 Encurvamento do feixe de RF para baixo, devido à diferença de velocidade da parte inferior da frente de onda, que se propaga por uma região onde a atmosfera é mais densa (B) em relação às regiões mais altas (A).

3.1.4 Difração de Onda Eletromagnética

O fenômeno da difração pode ser entendido com base no princípio descoberto em 1678 por Christiaan Huygens [22]. Cada ponto de uma dada frente de onda atua como se fosse uma fonte puntiforme de ondas eletromagnéticas. Quando uma frente de onda atinge o topo dos obstáculos ocorre espalhamento de energia. Como consequência, regiões próximas ao obstáculo, que eventualmente estariam totalmente obstruídas (áreas de sombra), passam a receber uma parcela da energia difratada. Este fenômeno se mostra extremamente útil principalmente nos sistemas celulares, nos quais a estação móvel está normalmente obstruída em relação à ERB. Observa-se que o efeito do espalhamento de energia no topo dos obstáculos é maior para maiores comprimentos de onda (frequências mais baixas). A Fig. 3.3 ilustra tal fenômeno, considerando duas ondas de rádio de frequências diferentes, sendo $f_2 > f_1$ [23].

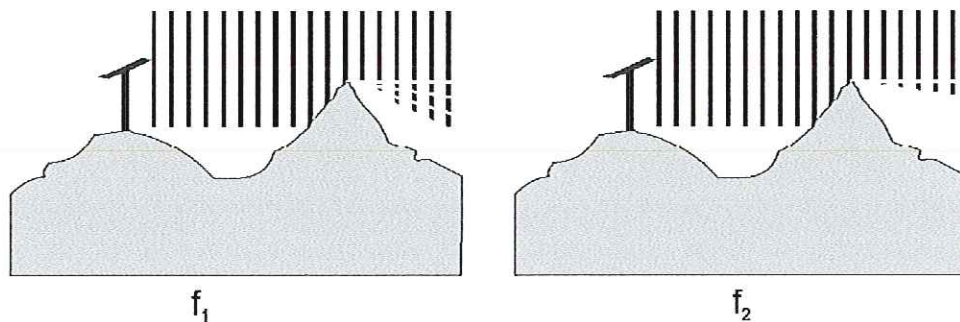


Figura 3.3. Contorno de obstáculos por ondas eletromagnéticas, na qual $f_2 > f_1$.

3.1.5 Reflexão de Onda Eletromagnética

Se uma onda eletromagnética que se propaga em um determinado meio, com índice de refração n_1 , incide sobre a interface de separação deste com outro meio com índice de refração n_2 , parte da energia eletromagnética é refletida de volta ao meio n_1 e parte é transmitida para o meio n_2 , penetrando no mesmo e parte da energia é absorvida na interface. Quanto maior a frequência do sinal incidente ou da condutividade do meio no qual a onda eletromagnética incide, menor será a parcela de energia refratada [20]. Outras características físicas que influem sobre a reflexão de ondas eletromagnéticas são o grau de regularidade da superfície refletora, o ângulo de incidência sobre a interface e o tipo de polarização da onda incidente [24]. Quanto maior a regularidade da superfície refletora, mais direcionada será a reflexão das ondas eletromagnéticas. Superfícies irregulares tendem a espalhar o sinal incidente. O grau de regularidade da superfície envolvida está relacionado com o comprimento de onda de operação [24].

A polarização das ondas eletromagnéticas, dada pela orientação do campo elétrico em relação ao plano de incidência, é outro parâmetro que influencia na reflexão destas. Para incidência sobre o solo, por exemplo, observa-se que as ondas com polarização horizontal apresentam reflexão mais intensa, quando comparadas com as de polarização vertical.

3.1.6 Desvanecimento (*fading*)

O desvanecimento de onda é a variação aleatória na amplitude do sinal recebido ao longo do tempo. A causa do desvanecimento é a variação das propriedades do meio de

propagação (atmosfera). O desvanecimento é classificado quanto às suas causas em desvanecimento por obstrução, por propagação em percursos múltiplos, por efeito de dutos, por efeito de chuvas e por reflexão. No caso dos sistemas móveis celulares, existe maior ocorrência do desvanecimento devido a percursos múltiplos, dada a complexidade do meio (obstáculos) entre o equipamento móvel e a ERB. Os demais tipos de desvanecimento ocorrem principalmente em enlaces ponto a ponto estáticos e de longa distância.

O desvanecimento devido a percursos múltiplos (Rayleigh) resulta de o sinal recebido por uma antena ser a composição de ondas que se propagam de forma direta entre os transceptores envolvidos e de outras que seguem trajetórias distintas. Um exemplo de sinal recebido por um equipamento celular, evidenciando a presença do desvanecimento de Rayleigh é mostrado na Fig. 3.4.

Estes múltiplos percursos são o resultado de refração na atmosfera (ainda que em pequena intensidade, resultantes de variações no valor do índice de refração com a altitude) e reflexões no solo ou em superfícies diversas. A energia transportada por estes percursos múltiplos é, em geral, bem menor que a do feixe principal (10 vezes menor). Entretanto, quando o feixe principal sofre atenuação acentuada, como em obstrução parcial ou interferências por reflexão, a energia recebida pelos percursos múltiplos passa a desempenhar papel relevante na continuidade da transmissão do sinal. Este tipo de desvanecimento é chamado de rápido, pois se manifesta ao longo do tempo por meio de uma seqüência de variações abruptas na amplitude do sinal recebido. Geralmente, manifesta-se em comunicação via rádio estabelecida em um ambiente de propagação móvel, no qual a posição do equipamento móvel em relação à ERB varia constantemente.

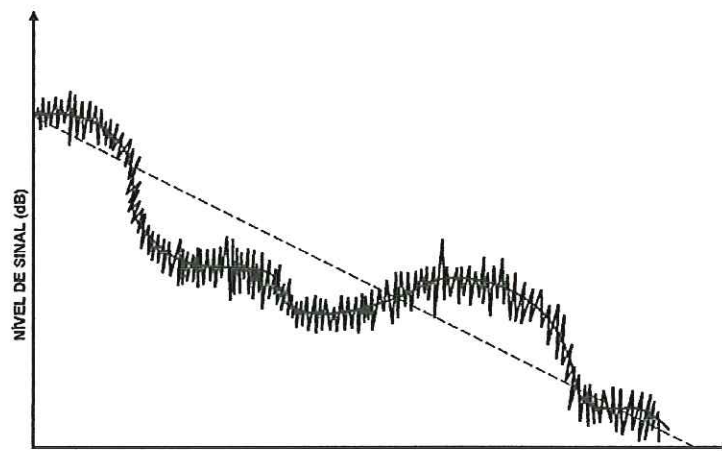


Figura 3.4. Variação do nível de sinal recebido com a distância, em um ambiente celular, evidenciando a existência de desvanecimento rápido – *fading* de Rayleigh. A linha pontilhada mostra o valor teórico do nível de sinal que seria recebido, baseando em um modelo matemático de propagação adequado para a situação.

3.2 – Ferramentas de Predição

Considerando que o objetivo deste estudo é analisar, por meio de medidas, os principais modelos clássicos de propagação para regiões urbanas, é preciso conhecer as características do ambiente em questão. Isto possibilita uma compreensão melhor dos resultados obtidos na simulação dos modelos, assim como das informações provenientes dos testes de campo. A propagação de sinal para sistemas móveis celulares ocorre em ambientes urbanos, geralmente irregulares, função da topografia local associada a numerosas barreiras físicas (construções). Nestes ambientes, geralmente o equipamento móvel não está em visada direta em relação à ERB. Sendo assim, nas transmissões entre os transceptores predominam as ondas eletromagnéticas oriundas de reflexões, refrações e difrações. Os códigos de construção civil variam de lugar para lugar, resultando em diferenças nas estruturas e exigindo volumosos bancos de dados sobre as características do ambiente em questão. Adicionalmente, um sistema celular lida com assinantes móveis, cujo posicionamento em relação a ERB pode variar constantemente, tanto para equipamentos móveis abrigados (*indoor*) ou não (*outdoor*). Como consequência, a potência recebida pelas estações terminais é o resultado da composição dos sinais que percorrem trajetórias diretas (quando existem) entre a ERB e o aparelho móvel, com componentes que sofrem reflexões e difrações em diversas estruturas (inclusive no solo). Também fazem parte desta composição as ondas eletromagnéticas que alcançam as estações terminais por meio da penetração nas estruturas, que sofrem atenuações devido à absorção pelos materiais. Todos esses fatores dificultam o estabelecimento de um padrão de análise [1]. Entretanto, com o visível crescimento da demanda por serviços móveis de voz e dados, as operadoras necessitam cada vez mais de investimentos em infra-estrutura, visando obter uma cobertura *downlink* com níveis de potência recebidos pelo equipamento móvel entre -90 dBm e -100 dBm [37], de forma a atender aos requisitos mínimos de qualidade de serviço. Sendo assim, estas empresas constantemente se vêem obrigadas a aumentar a quantidade de ERBs, reduzindo o tamanho das células. Tal fato torna a área de cobertura das estações mais pontual. Com isso, cria-se uma maior capacidade de escoamento do crescente tráfego telefônico, além de eliminar possíveis áreas de sombra e de contribuir para a melhoria da cobertura *indoor*. A cada nova ERB ativada em uma área de cobertura, onde já exista reuso de frequências, é necessário que se efetue um novo planejamento do grupo de frequências para esta região, para que a qualidade do serviço prestado não seja comprometida [25]. Assim, há

modificação nos grupos de frequências e potência de saída de cada setor e alteração nos parâmetros de vizinhança dos setores. Diante do exposto, é importante que as empresas prestadoras de serviço móvel celular disponham de ferramentas computacionais eficientes, assim como informações digitalizadas— bases de dados— relativas à região de interesse, para uma eficiente predição de cobertura [2]. Desta forma, torna-se possível a realização das modificações necessárias ao sistema, com transições suaves e transparentes ao usuário.

Há várias ferramentas de predição comercialmente disponíveis, como Celplanner [33] e Plannet [40]. O funcionamento delas depende da execução de grande quantidade de cálculos baseados em expressões matemáticas que permitam determinar a atenuação das ondas eletromagnéticas devido à propagação em ambientes urbanos. A execução dos cálculos depende de bases de dados digitalizadas que contenham informações precisas de topografia e morfologia associadas a coordenadas geográficas (geo-referenciadas). Com isso, é possível prever a intensidade do sinal recebido por um equipamento móvel localizado na região de cobertura de uma determinada ERB. A confiabilidade da predição obtida dependerá da precisão da base de dados disponibilizada ao software e da utilização de modelos de propagação adequados à região de interesse.

3.2.1 Modelos de Propagação de Onda Eletromagnética Para Comunicações Móveis Celulares

Os modelos de propagação de onda eletromagnética são utilizados para prever o nível de sinal em ambiente urbano de comunicação móvel celular. Os modelos de propagação podem ser reunidos em duas classes básicas. A primeira delas corresponde aos modelos que permitem obter informações relativas à atenuação de percurso (*large scale path loss*), usados no dimensionamento da cobertura *downlink* das ERBs. A segunda classe engloba os modelos de natureza estatística e têm como objetivo obter outros parâmetros, conhecidos como de propagação de pequena escala (*small scale propagation parameters*), importante para o projeto da parte de recepção dos transceptores celulares. Como exemplo destes parâmetros temos o espalhamento Doppler, tempo de coerência e atraso (rms) devido ao espalhamento. Como o objetivo deste trabalho é analisar a cobertura *downlink* de uma cidade de pequeno porte, o estudo teórico necessário será fundamentado na análise dos modelos pertencentes à primeira classe. A classe dos modelos usados no cálculo da

atenuação de percurso, por sua vez, pode ser subdividida em três outras subclasses em função das diferentes metodologias usadas na sua obtenção. São eles os modelos empíricos, os semi-empíricos e os determinísticos [12].

Os modelos empíricos são descritos por equações obtidas por meio de análises estatísticas de um grande número de medidas efetuadas em regiões de interesse, dispensando a necessidade de informações detalhadas acerca do ambiente envolvido. Os modelos incluídos nesta classe exibem boa precisão quando usados em ambientes que apresentam características semelhantes àquelas da região para qual foram obtidos. A principal desvantagem dos modelos de propagação empíricos é que necessitam de adaptações para serem usados em ambientes com características diferentes daquelas em que as medições para a obtenção do mesmo foram feitas [2]. Exemplos de modelos empíricos são os de Okumura-Hata, de Lee, de Hata [12].

Os modelos semi-empíricos são obtidos a partir da teoria eletromagnética. Nestes, são consideradas algumas condições iniciais que variam de acordo com o objetivo do modelo e região analisada. Por exemplo, a determinação de expressão que considera a difração no topo das construções pode ser simplificada adotando como uniformes o espaçamento e a altura das construções. Como consequência, as expressões obtidas também são expressões fechadas que se baseiam em características mais específicas do cenário envolvido, diferentemente dos modelos empíricos. Entretanto, desde que as informações necessárias estejam disponíveis, a manipulação destes modelos mostra a mesma facilidade observada para os modelos empíricos, com a vantagem de apresentarem, teoricamente, resultados mais precisos [1], [2]. Por sua vez, assim como os modelos empíricos, os semi-empíricos têm como limitação a necessidade de ajustes em parâmetros, quando utilizados em ambientes muito diferentes daqueles em que foram obtidos [25]. Exemplos de modelos semi-empíricos são o de Ikegami, de Walfisch-Bertoni e de Walfisch-Ikegami [12].

Os modelos determinísticos são baseados na utilização de métodos numéricos e computacionais, teoria eletromagnética e base de dados muito detalhada que descrevem o ambiente em questão. Nestes modelos, o nível de sinal em um determinado ponto de interesse é obtido pela composição das contribuições individuais (amplitude e fase) de cada onda eletromagnética que passa por este ponto, de diferentes trajetórias causadas pela interação entre energia irradiada no ponto de transmissão e o cenário urbano. Sendo assim, a potência recebida em um determinado ponto é o resultado das contribuições de ondas eletromagnéticas que percorrem trajetória direta entre os pontos envolvidos, assim como

daquelas refletidas nas estruturas próximas (construções, solo, etc) e refratadas nas bordas das estruturas (espalhamento) [2], [12]. A Fig. 3.5 mostra, de maneira simplificada, um exemplo destas possíveis trajetórias, onde foi considerado apenas um evento de reflexão e refração. Em modelos mais complexos, eventos com várias reflexões e refrações são considerados, tornando a predição mais precisa, porém exigindo maior esforço computacional.

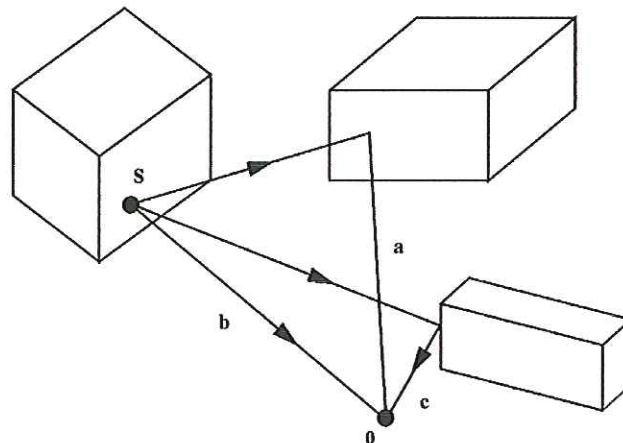


Figura 3.5. Exemplo de possíveis trajetórias em linha direta (a), provenientes de reflexão (b) e difração (c), de raios emitidos no ponto S (*source*) que passarão pelo ponto de recepção O . Neste exemplo, consideram-se apenas reflexões e refrações de primeira ordem.

Estes modelos utilizam técnicas computacionais de traçado de raios (*shooting and bouncing rays* e *image method*), teoria geométrica da difração (*geometrical theory of diffraction—GTD*) e teoria uniforme da difração (*uniform theory of diffraction—UTD*) para obter as contribuições individuais das ondas eletromagnéticas de cada trajetória. Normalmente, as bases de dados empregadas nestas ferramentas seguem os padrões de projeto auxiliado por computador (*computer aided design—CAD*), devido à facilidade com que são encontrados junto aos órgãos oficiais (prefeituras, por exemplo), e ao baixo custo envolvido. As ferramentas de predição, por sua vez, podem ser estruturadas sobre bases de dados em duas (2D) ou três (3D) dimensões. Os modelos determinísticos apresentam como desvantagens a dificuldade na confecção da ferramenta (construção do software) e o considerável esforço computacional exigido na obtenção de resultados. Este fato se agrava de acordo com a complexidade do ambiente analisado e com a ordem de eventos a ser considerada (múltiplas reflexões e difrações nas estruturas) [2]. Existem, no entanto, algumas técnicas computacionais de aceleração, como o *binary space partitioning algorithm* (BSP), que são empregadas em conjunto com estas ferramentas de predição [12]. Apesar disto, os modelos determinísticos mostram maior precisão na predição de cobertura, por

considerar, com elevado grau de detalhamento, as características do cenário envolvido. Além disso, não apresentam as limitações observadas para os modelos empíricos e semi-empíricos, podendo ser empregados em qualquer ambiente. Na prática, o uso dos modelos determinísticos se restringe à predição em ambientes de microcélula (áreas pequenas, com as dimensões do raio da célula variando entre 100 m e 1 km, com sistema irradiante do equipamento normalmente abaixo da linha das construções) e picocélula (áreas muito pequenas, com dimensões entre 10 m e 100 m) e *indoor*. Estes modelos se mostram impróprios para predição em regiões de macrocélula (áreas em que as antenas da ERB estão acima da linha das construções, com dimensões entre 1 km e 30 km) [12], devido ao esforço computacional necessário e à enorme base de dados exigida. Exemplo de modelo determinístico é o software 3D FASPRO [26], desenvolvido pela Philips para predição *indoor*, com base na técnica de diferença finita no domínio do tempo (*finite difference time domain*—FDTD) [9].

Visto que o ambiente de propagação móvel da localidade estudada neste trabalho é típico de macrocélula, o uso dos modelos de propagação empíricos e semi-empíricos se mostra mais adequado. Portanto, alguns modelos destas classes devem ser selecionados, de forma a compor o elenco de ferramentas de análise. Não foram usados modelos determinísticos para a análise do ambiente urbano estudado devido às dimensões da região (macrocélula) e da ausência de bases de dados detalhadas do local.

Em relação aos modelos empíricos, decidimos utilizar os modelos de Okumura-Hata e o modelo de Lee, enquanto que na classe de modelos semi-empíricos, os escolhidos são os modelos de Walfisch-Bertoni, o modelo de Ikegami e o modelo de Walfisch-Ikegami. A escolha destes modelos baseou-se no fato de serem consagrados na análise de ambientes para comunicações móveis, além de, alguns deles, formarem a base de várias ferramentas de predição usadas comercialmente. Como exemplo, temos a ferramenta de predição Celplanner® [33], que fornece a opção de emular os modelos de Okumura-Hata e Walfisch-Ikegami por meio de correta organização dos parâmetros de configuração da predição, além de disponibilizar uma opção otimizada do modelo de Lee, denominado modelo de Lee-Picquenard [15]. Uma descrição destes modelos é feita a seguir.

3.2.1.1 Modelo de Lee

O modelo de Lee é empírico, usado na predição de níveis de sinais em macrocélulas de áreas urbanas e suburbanas [12]. Foi desenvolvido a partir de medições em ambientes de algumas cidades americanas e japonesas (Tokyo). Baseia-se no princípio de que é possível prever a atenuação devido ao percurso em uma região relativamente plana, sem conhecimento de particularidades da topografia e morfologia local. O uso do modelo de Lee na predição de cobertura celular em regiões acidentadas (morros) implica em alta probabilidade de se obter grandes desvios entre os valores teóricos e aqueles verificados por meio de medições. Mesmo em regiões consideradas planas, a atenuação obtida pode desviar do valor teórico devido às diferenças existentes na ocupação da topografia local (morfologia). O modelo desenvolvido por Lee baseou-se em exaustivas medições de sinal em algumas cidades com características diferentes, com o objetivo de se encontrar parâmetros de ajuste a serem incorporados na expressão, permitindo com isso adequar a aplicação do modelo a outras regiões morfologicamente semelhantes. O modelo área-para-área (outra denominação recebida pelo seu proponente) é dado por [10]:

$$P_r = P_{r_0} \left(\frac{r}{r_0} \right)^{-\gamma} \left(\frac{f}{f_0} \right)^{-n} \alpha_0, \quad (3.3)$$

ou, em dB,

$$P_r = P_{r_0} - \gamma \log \left(\frac{r}{r_0} \right) - n \log \left(\frac{f}{f_0} \right) + \alpha_0, \quad (3.4)$$

nas quais P_r é o nível de potência teórico recebido pelo móvel; P_{r_0} é o nível de potência existente a 1,6 km (1 milha) do ponto de transmissão, r é a distância entre a ERB e a estação móvel, dada em milhas ou quilômetros; r_0 é a distância de referência e vale 1 (dada em milhas) ou 1,6 (dada em km); γ é a taxa de variação da atenuação com a distância e pode ser dado no formato decimal, quando usado em (3.5) ou em dB/década, para uso em (3.4); f é a frequência de operação; f_0 é a frequência de referência, usada na obtenção do modelo (900 MHz); α_0 é o fator de ajuste do modelo, que também é usado para adequar a expressão às condições diferentes daquela originalmente prevista; e n é outro fator de ajuste da expressão e pode ser determinado a partir de dados empíricos da região estudada, em dB/ década.

Segundo Lee [10], a razão em se adotar como base a potência a partir de 1 milha do ponto de transmissão é que dentro de uma região circular, com centro na ERB em questão e

raio com valor descrito, existe pouca influência dos elementos morfológicos (arruamento, construções, etc) no aumento da atenuação do sinal transmitido.

O fator n é obtido dentro da seguinte faixa [10]:

$$20\text{dB/década} \leq n \leq 30\text{dB/década}, \quad (3.5)$$

sendo válido para frequências que vão de 30 a 2000 MHz e distâncias que variam de 1 a 30 km. Para sistemas operando em regiões urbanas, com frequências superiores a 450 MHz (caso dos sistemas celulares), $n = 30$ dB/década tem sido geralmente adotado, mostrando boa aproximação com a realidade. O fator α_o é o segundo fator de ajuste do modelo, que também é usado para adequar a expressão às condições diferentes daquela originalmente prevista. Para a obtenção deste são utilizadas algumas condições iniciais, a partir das quais são obtidos os fatores de ajuste pretendidos. As condições iniciais, usadas na obtenção do modelo, são mostradas na tabela 3.1.

Tabela 3.1. Condições iniciais usadas na obtenção do modelo de Lee.

Parâmetro	Valor
Frequência	900 MHz
Altura sistema irradiante ERB	30,48 m (100 pés)
Potência efetivamente irradiada (ERP) pela antena da ERB	10 W
Ganho da antena transmissora	6 dBd
Altura da antena do equipamento móvel	3 m (10 pés)
Ganho da antena do equipamento móvel	0 dBd

O fator α_o é formado pelo produto de 5 outros fatores intermediários ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ e α_5), que podem ser calculado por

$$\alpha_1 = \left(\frac{h_{\text{novaBTS}}(m)}{30,48} \right)^2, \quad (3.6)$$

$$\alpha_2 = \left(\frac{h_{\text{novaMS}}(m)}{3} \right)^v, \quad (3.7)$$

$$\alpha_3 = \frac{P_{\text{novaTX}}(W)}{10}, \quad (3.8)$$

$$\alpha_4 = \frac{G_{\text{novaTX}}(\text{dipolo}\lambda/2)}{4}, \quad (3.9)$$

$$\alpha_5 = G_{\text{novaRX}}, \quad (3.10)$$

nas quais $h_{novaBTS}$ é a nova altura para as antenas da estação transmissora, h_{novaMS} é a nova altura para a estação móvel, P_{novaTX} é a nova potência de transmissão da antena da ERB, G_{novaTX} é o novo ganho da antena de transmissão da antena da ERB em relação ao dipolo de $\frac{1}{2}$ onda, G_{novaRX} é o novo ganho da antena de recepção no móvel (caso exista) e ν é o valor usado na determinação de α_2 , também obtido por meio de medições. Os valores possíveis são $\nu = 2$, para alturas da antena da estação móvel maiores que 10 m e $\nu = 1$, para alturas da antena da estação móvel menores que 3 m.

Em geral, 2 dB de ganho é adotado para uma antena convencional normalmente usada em aparelhos celulares em áreas suburbanas, e 1dB em áreas urbanas [10]. Sendo assim, α_o pode ser expresso por

$$\alpha_o = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_4 \cdot \alpha_5. \quad (3.11)$$

A Equação (3.13) em dB é dada por

$$\alpha_o = \sum_{i=1}^5 \alpha_i (dB) \quad (3.12)$$

na qual cada α_i deve ser convertido para a escala dB.

Os parâmetros γ e P_{ro} são determinados por meio de medições em campo. Sendo assim, alguns valores destas variáveis são mostrados na Tabela 3.2, para diferentes condições de morfologia [10].

Tabela 3.2. Parâmetros γ e P_{ro} , obtidos por meio de medições de campo, para diferentes condições de morfologia.

Região	P_{ro} (dBm)	γ (dB/década)
Espaço livre	- 45	20
Área aberta	-61,7	38,4
Filadélfia	-70	36,8
Newark	-64	43,1
Tokyo	-84	30,5
Área suburbana (cidades americanas)	61,7	38,4

Reescrevendo (3.4), considerando todas as variáveis e fatores de correção envolvidos, teremos as seguintes expressões que estabelecem o modelo de Lee [10]:

$$P_r = -61,7 - 38,4 \log(r) - n \log(f/900) + \alpha_o \text{ (suburbano)}, \quad (3.13)$$

$$P_r = -70 - 36,8 \log(r) - n \log(f/900) + \alpha_o \text{ (Filadélfia)}, \quad (3.14)$$

$$P_r = -64 - 43,1 \log(r) - n \log(f/900) + \alpha_o \text{ (Newark)}, \quad (3.15)$$

sendo que α_0 pode ser calculado pela seguinte expressão, em dB:

$$\alpha_0 = 20 \log\left(\frac{h_b}{30,48}\right) + 10 \log\left(\frac{P_t}{10}\right) + g_1 - 6 + g_2 + 10 \log\left(\frac{h_m}{3}\right), \quad (3.16)$$

nas quais P_r é a potência recebida pelo móvel, em dBm; P_t é a potência transmitida pela ERB, em Watts; h_b e h_m são as alturas das antenas da ERB e do móvel, respectivamente, em metros; g_1 e g_2 são os ganhos das antenas da ERB e do móvel, em dBd; r é a distância entre a ERB e o móvel, em milhas; e f é a frequência, em MHz.

Exemplos de soluções do conjunto de equações (3.13)-(3.16) é mostrado na Fig. 3.6 [10], na qual foram adotados: potência de transmissão, P_t , de 10 W, ganho da antena transmissora, g_1 , de 6 dBd, ganho da antena do móvel, g_2 , de 0 dBd, altura das antenas da ERB de 30,48 m (100 pés) e altura da antena do móvel de 3 m (10 pés).

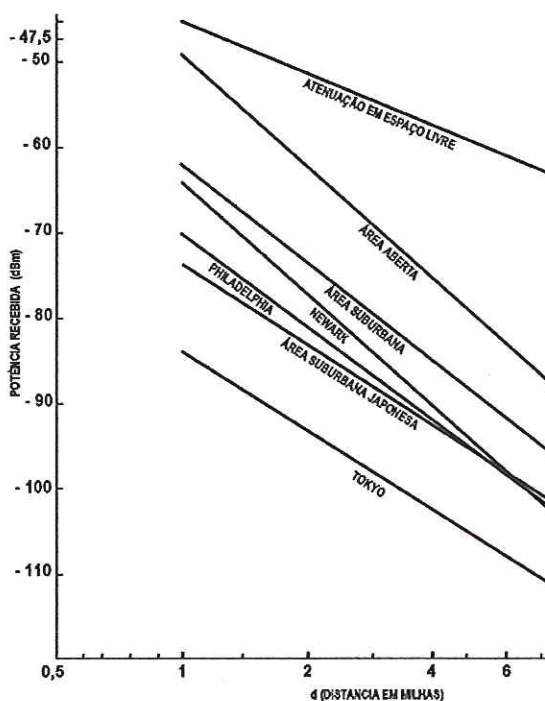


Figura 3.6. Atenuações de percurso em diferentes ambientes [10].

Os valores obtidos por meio de (3.13)-(3.16) devem ser considerados valores médios. O desvio padrão destes em relação a medições de campo deve ser de 8 dB, no máximo, acima ou abaixo dos valores teóricos tomados como referência [10].

Com o objetivo de ampliar as possibilidades de análise dos modelos estudados, outros gráficos foram gerados. Nestes, para o cálculo da potência recebida pelo móvel, alguns parâmetros tiveram seus valores alterados (como por exemplo, diferentes valores de frequência) enquanto outros parâmetros foram fixados (altura da ERB, potência de

transmissão). Desta forma foi possível identificar, dentre os parâmetros do modelo, aquele(s) que apresenta(m) maior ou menor ponderação no cálculo da intensidade de sinal recebido. Para o caso do modelo de Lee, estes gráficos são apresentados a seguir. Em todos eles, obteve-se a potência recebida pelo móvel *versus* distância, sendo na Fig. 3.7, para diferentes condições de frequência; na Fig. 3.8, para diferentes condições de h_b ; na Fig. 3.9, para diferentes condições de h_m e na Fig. 3.10, para diferentes condições de P_t . Os demais parâmetros, usados no modelo, tiveram seus valores fixados e estão indicados na legenda de cada figura.

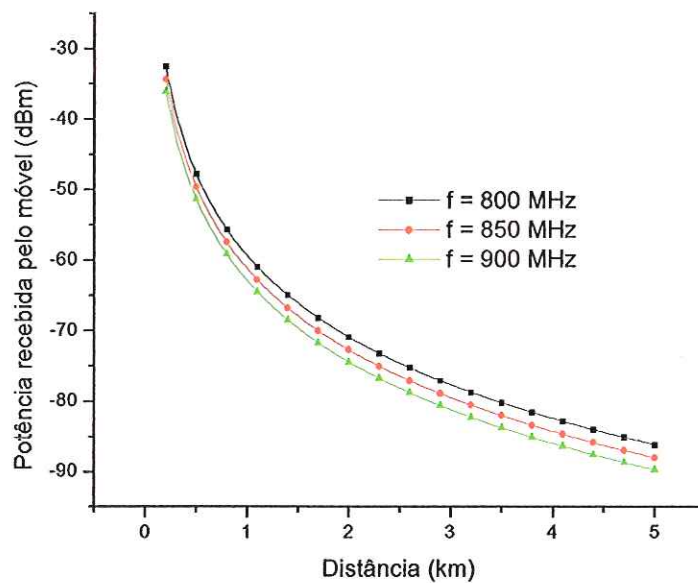


Figura 3.7. Variação da potência recebida por uma estação móvel com a distância, por meio do modelo de Lee, para diferentes condições de frequências. Parâmetros usados na simulação: $h_b = 50\text{m}$, $P_t = 5\text{W}$, $g_1 = 6\text{ dB}$, $g_2 = 0\text{ dB}$, $h_m = 1,7\text{m}$, $n = 30$.

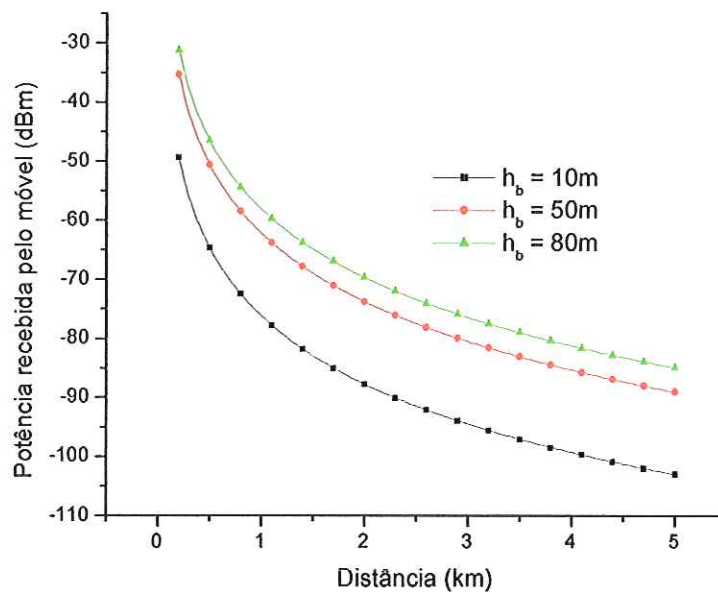


Figura 3.8. Variação da potência recebida por uma estação móvel com a distância, por meio do modelo de Lee, para diferentes condições de h_b . Parâmetros usados na simulação: $f = 880\text{MHz}$, $P_t = 5\text{W}$, $g_1 = 6\text{ dB}$, $g_2 = 0\text{ dB}$, $h_m = 1,7\text{m}$, $n = 30$.

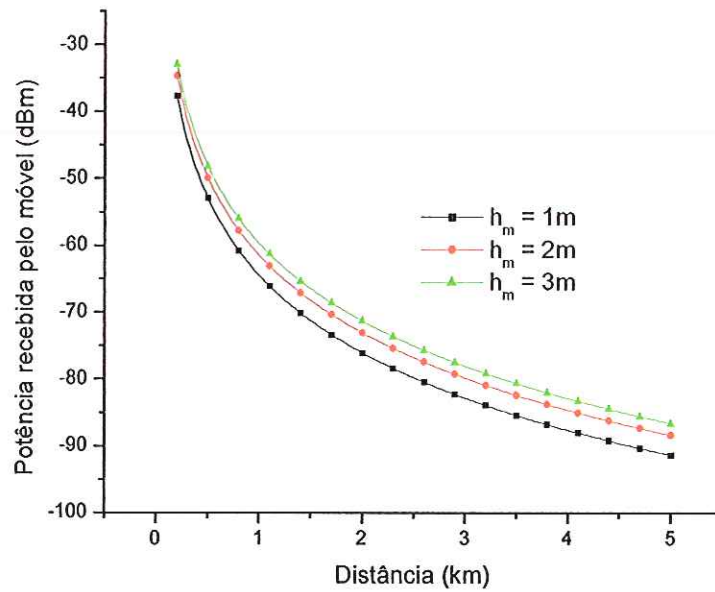


Figura 3.9. Cálculo da potência recebida por uma estação móvel, por meio do modelo de Lee, para diferentes condições de h_m . Parâmetros usados na simulação: $f = 880\text{MHz}$, $P_t = 5\text{W}$, $g_1 = 6\text{ dB}$, $g_2 = 0\text{ dB}$, $h_b = 50\text{m}$, $n = 30$.

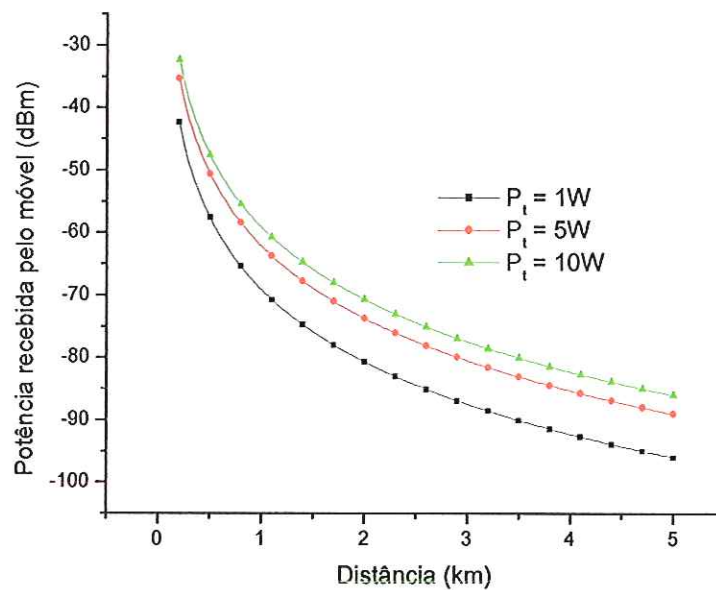


Figura 3.10. Cálculo da potência recebida por uma estação móvel, por meio do modelo de Lee, para diferentes condições de P_t . Parâmetros usados na simulação: $f = 880\text{MHz}$, $h_m = 1,7\text{m}$, $g_1 = 6\text{ dB}$, $g_2 = 0\text{ dB}$, $h_b = 50\text{m}$, $n = 30$.

3.2.1.2 Modelo de Okumura-Hata

Para a predição da potência média recebida por um equipamento móvel em um ambiente urbano de topografia plana, Okumura propôs uma família de curvas, com base em extensivas medições feitas na cidade de Tóquio e imediações, que relacionam a atenuação

média e a frequência de operação [11]. Com o auxílio dos gráficos mencionados, a seguinte expressão permite calcular a potência média teórica recebida por um móvel:

$$P_r = P_0 - A_m(f, d) + H_b(h_b, d) + H_m(h_m, f), \quad (3.17)$$

na qual P_r é o valor da potência média recebida pelo móvel em um ambiente urbano e P_0 é a potência que seria recebida pelo móvel através da propagação de ondas eletromagnéticas pelo espaço livre, sem obstruções, dada por:

$$P_0 = P_t - L_0, \quad (3.18)$$

na qual P_t é potência transmitida a partir da antena da ERB e L_0 é a atenuação em espaço livre, calculada por:

$$L_{0(dB)} = 32,44 + 20 \log(f_{(MHz)}) + 20 \log(r_{(km)}), \quad (3.19)$$

nas quais $A_m(f, d)$ é a atenuação média relativa à propagação das ondas eletromagnéticas em um ambiente urbano, com terreno praticamente plano, considerando-se as antenas da ERB com altura de 200 m e a antena do móvel a uma altura de 3 m. Estas informações são obtidas por meio de [11]. $H_b(h_b, d)$ é o fator de ajuste considerado quando a altura do sistema de antenas é diferente do valor de referência (200 m), obtido em [11]; $H_m(h_m, f)$ é o fator de ajuste para alturas de antena da estação móvel diferentes do valor de referência (3m), também obtido em [11].

Para ambientes com características diferentes (regiões não-urbanas e/ou não-planas), outros ajustes devem ser feitos na expressão para P_r , que passa a ser dada por

$$P_r' = P_r + K_{so} + K_{ter} + K_{sp} + K_{is}, \quad (3.20)$$

na qual K_{so} é o fator de correção para áreas suburbanas ou abertas; K_{ter} é o fator de correção devido às irregularidades do terreno; K_{sp} é o fator de correção devido à inclinação do terreno e K_{is} é o fator de correção para áreas com terra e água. Todos estes coeficientes são obtidos em [11].

As expressões definidas por Okumura mostram boa aproximação em relação aos valores obtidos em testes de campo [11]. Entretanto, elas foram propostas em um formato inadequado para implementação computacional, devido ao fato de as informações estarem disponíveis em formato gráfico. Em termos computacionais, normalmente a entrada dos dados deve ser ponto a ponto, sendo que as rotinas implementadas devem fazer uso destas informações, fornecendo resultados relativos a cada ponto analisado. Para tornar as expressões obtidas por Okumura adequadas à implementação computacional, Hata desenvolveu expressões analíticas, baseadas na técnica de Okumura, que permitem calcular

a atenuação de percurso média, L_p , para áreas urbanas, suburbanas e abertas (ou rurais). Tais expressões são [1]:

$$L_p(dB) = C_0 + C_1 + C_2 \log(f) - 13,82 \log(h_b) - a(h_m) + \{[44,9 - 6,55 \log(h_b)] \log(r)\}, \quad (3.21)$$

para áreas urbanas;

$$L_p(dB) = L_p(\text{área urbana}) - 2 \left[\log\left(\frac{f}{28}\right) \right]^2 - 5,4, \quad (3.22)$$

para áreas suburbanas;

$$L_p(dB) = L_p(\text{área urbana}) - 4,78 [\log(f)]^2 + 18,33 \log(f) - 40,94, \quad (3.23)$$

para áreas abertas (rurais).

O valor de $a(h_m)$ pode ser calculado por

$$a(h_m) = [1,1 \log(f) - 0,7] h_m - [1,56 \log(f) - 0,8], \quad (3.24)$$

para áreas urbanas;

$$a(h_m) = 3,2 [\log(11,75 x h_m)]^2 - 4,97, \quad (3.25)$$

para áreas urbanas densas.

Os parâmetros C_0 , C_1 e C_2 são mostrados na tabela 3.3 e, de acordo com [11], os ambientes urbanos são classificados segundo a tabela 3.4.

Tabela 3.3. Parâmetros usados no modelo de Okumura-Hata.

Parâmetro	Valor
C_0	0 dB (áreas urbanas)
	3 dB (áreas urbanas densas)
C_1	69,55 (150 MHz a 1000 MHz)
	46,30 (1500 MHz a 2000 MHz)
C_2	26,16 (150 MHz a 1000 MHz)
	33,90 (1500 MHz a 2000 MHz)

Tabela 3.4. Classificação dos ambientes móveis celulares.

Categoria	Características
Áreas abertas	Poucas estruturas físicas no caminho de propagação entre a ERB e o ponto analisado, como áreas de fazendas, campos abertos.
Áreas suburbanas	Áreas residenciais, cujas construções apresentam um ou dois andares e baixa densidade de ocorrência.
Áreas urbanas	Áreas constituídas de construções altas, com maior densidade de ocorrência em relação às áreas suburbanas.

Da mesma forma que no modelo de Lee, foram gerados gráficos que permitem avaliar a influência de cada parâmetro do modelo em questão, na determinação da atenuação de percurso.

Em todos eles, obteve-se a atenuação de percurso *versus* distância, em dB, na Fig. 3.11, para diferentes condições de frequência; na Fig. 3.12, para diferentes condições de h_b e na Fig. 3.13, para diferentes condições de h_m . Os demais parâmetros, usados no modelo, tiveram seus valores fixados e estão indicados na legenda de cada figura. Os resultados são mostrados a seguir.

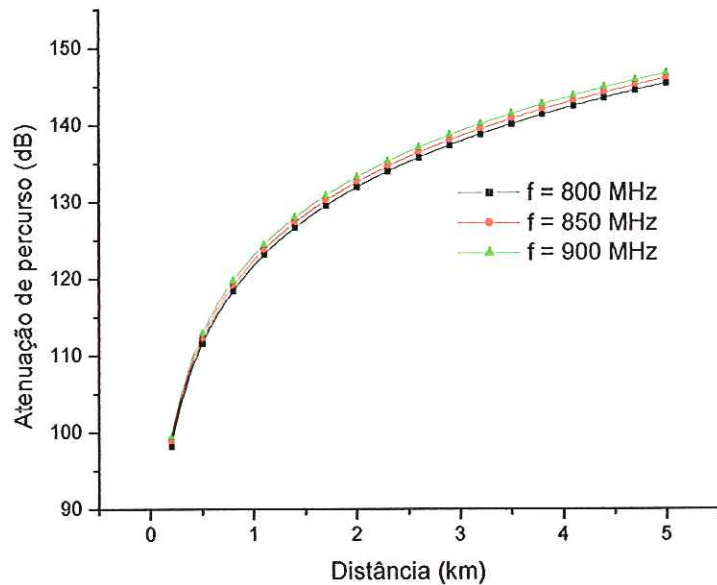


Figura 3.11. Variação da atenuação no percurso entre ERB e móvel com a distância, por meio do modelo de Okumura-Hata (urbano), para diferentes condições de frequências. Parâmetros usados na simulação: $C_0 = 0$; $C_1 = 69,55$; $C_2 = 26,16$; $h_b = 50\text{m}$; $h_m = 1,7\text{m}$.

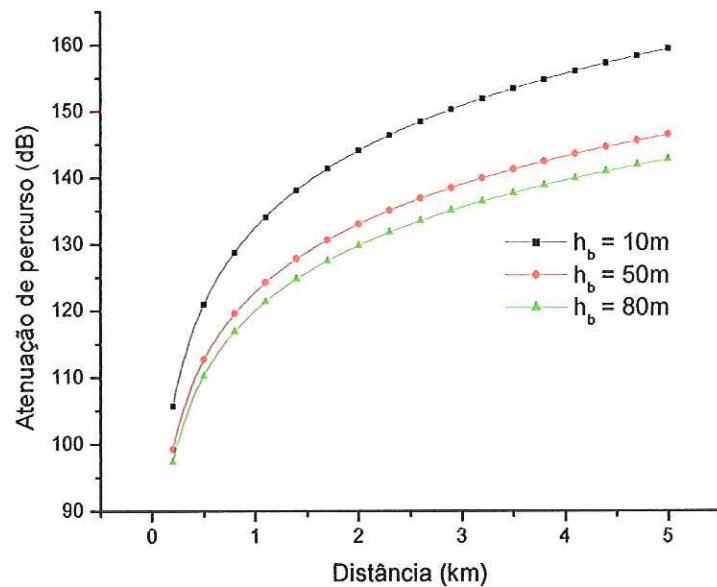


Figura 3.12. Variação da atenuação no percurso entre ERB e móvel com a distância, por meio do modelo de Okumura-Hata (urbano), para diferentes condições de h_b . Parâmetros usados na simulação: $f = 880\text{MHz}$; $C_0 = 0$; $C_1 = 69,55$; $C_2 = 26,16$; $h_m = 1,7\text{m}$.

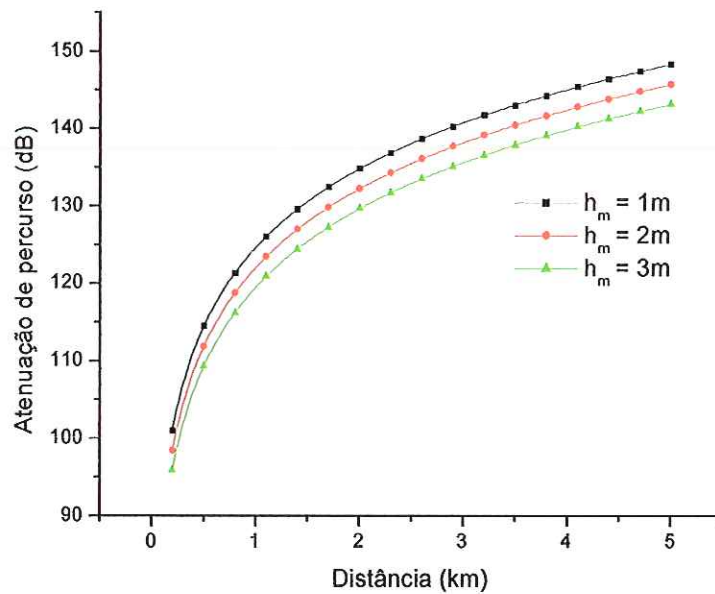


Figura 3.13. Variação da atenuação no percurso entre ERB e móvel com a distância, por meio do modelo de Okumura-Hata (urbano), para diferentes condições de h_m . Parâmetros usados na simulação: $f = 880\text{MHz}$; $C_0 = 0$; $C_1 = 69,55$; $C_2 = 26,16$; $h_b = 50\text{m}$.

3.2.1.3 Modelo de Walfisch-Bertoni

O modelo de Walfisch-Bertoni é semi-empírico, desenvolvido para frequências na faixa de UHF e áreas urbanas. Permite calcular a atenuação da potência transmitida entre uma ERB e um equipamento móvel, mesmo quando a linha de visada entre o a ERB e o móvel esteja comprometida. Tal modelo considera as características moderadas das construções em ambientes residenciais, comerciais e industriais, responsáveis pela composição da maior parte da morfologia urbana. A obtenção deste modelo baseou-se na condição de que o sistema irradiante da ERB, mais elevado do que o topo das construções, irradia ondas eletromagnéticas que se propagam acima da linha do ambiente construído. Por meio de múltiplas difrações no topo destas, parte da energia irradiada atinge o nível da rua, onde se localiza o equipamento móvel. Esta porção de campo difratado nas construções seria o sinal detectável pelo móvel [13]. Efeito de difração no estágio final de propagação urbana também foram propostos por [14], [27]. Desta forma, pode-se dizer que a propagação de ondas eletromagnéticas em trajetórias que atravessam as edificações ou, entre as mesmas, não correspondem a mecanismos predominantes na composição do sinal recebido, dentro da concepção de ambiente proposto, e sim a propagação acima das construções, como indicado

pela trajetória 1 da Fig 3.7. Sendo assim, a potência que chega ao nível do móvel resulta de difração que ocorrem no alto das edificações anteriores e próximas ao móvel [13].

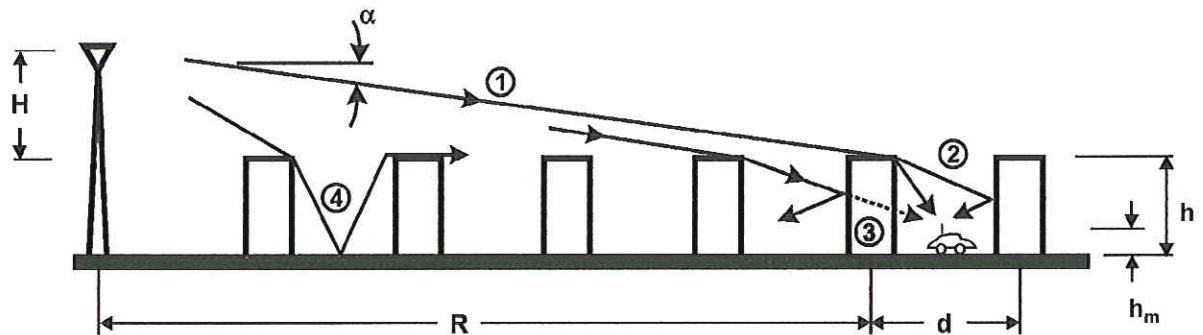


Figura 3.14. Vários caminhos possíveis para a propagação de ondas eletromagnéticas, na faixa de UHF, em ambientes construídos [13].

Além disso, verifica-se que, em cada linha de construção, uma porção do sinal seria direcionada para o solo, podendo ser redirecionado para o alto e na direção do móvel, em função das múltiplas reflexões e difrações possíveis. Tal situação é exemplificada pela trajetória 4 da Fig. 3.7. Entretanto, este efeito pode ser desprezado, devido ao elevado número de reflexões necessárias e ao elevado ângulo de incidência nas estruturas, que contribuem para uma redução considerável na amplitude do sinal. Considerando pequenos ângulos de incidência (α , mostrado na Fig. 3.7), algumas simplificações são efetuadas na determinação do modelo como, por exemplo, considerar linhas de edificações com a mesma altura e aproximação da propagação acima das construções para as características de ondas planas. Isto facilita a determinação da influência das construções sobre frentes de onda esféricas, provenientes de antenas elevadas. Neste procedimento, determina-se a amplitude do sinal no alto das construções, considerando-se uma onda plana incidente, $Q(x)$, com um ângulo α [13]. As linhas reais de edificações são substituídas por obstáculos opacos (absorvedores de energia de RF), planos e finos, conforme ilustra a Fig. 3.8.

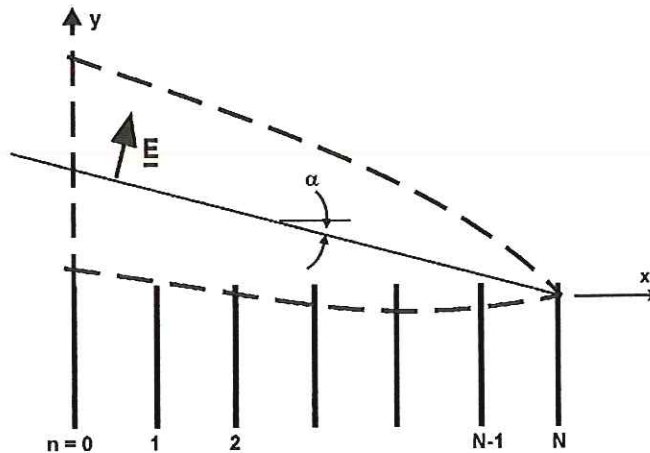


Figura 3.15. Avaliação da difração de uma frente de onda plana em uma seqüência de semi-obstáculos, mostrando a primeira zona de Fresnel, com inclinação α .

Diante do exposto, pode-se dizer que a determinação do modelo de propagação se resume na análise da difração que ocorre em uma série de obstáculos de mesma altura, como indicado na Fig. 3.8. A frente de onda plana propaga-se com ângulo α sobre uma série de obstáculos, separados por uma distância d . Tal distância representa o espaçamento entre as construções, tomado entre o centro das mesmas, variando normalmente de 30 a 60 m.

Vários estudos sobre difração em obstáculos foram propostos em [13], sendo que a maioria está limitada a um ou dois obstáculos. Deygout [28], entretanto, propôs um método aproximado para mais de dois obstáculos. Vogler [29] desenvolveu uma técnica que permite analisar a difração ocorrida em uma série de obstáculos, por meio de aplicação sucessiva da integral de Kirchhoff ao plano de cada obstáculo. Na obtenção do modelo foi adotada a integral de Kirchhoff-Huygens como método numérico de avaliação dos campos eletromagnéticos difratados através de uma série de n obstáculos. O efeito das ondas eletromagnéticas difratadas no obstáculo $n=0$ é usado para determinar a difração no obstáculo $n=1$, e assim sucessivamente. Como condições iniciais, foi adotado que a onda plana incidente apresenta amplitude unitária para o campo magnético H , sendo este polarizado ao longo do eixo z , conforme FIG. 3.8. Desprezando variações ao longo de z , o campo $H_{n+1}(y)$, incidente no obstáculo $n+1$ devido ao campo $H_n(y')$ sobre o n -ésimo obstáculo, é dados por [13]:

$$H_{n+1}(y) = \frac{e^{j\pi/4}}{2\sqrt{\lambda}} \int_0^{\infty} H_n(y') \frac{e^{-jkr}}{\sqrt{r}} (\cos\delta + \cos\alpha) dy' \quad (3.26)$$

na qual

$$r = \sqrt{d^2 + (y - y')^2}, \quad (3.27)$$

$$\cos\delta = d/r. \quad (3.28)$$

Uma análise de (3.26) mostra que a integração deve ser fracionada em intervalos discretos, Δ , podendo ser aproximada por uma somatória. Observa-se também que estes intervalos devem ser pequenos quando comparados com o comprimento de onda em questão. Para tomar os maiores valores possíveis de Δ , serão analisadas separadamente as componentes de amplitude e fase do integrando de (3.26). Sendo assim, a fase $\Phi(y')$ é dada por [13]:

$$\phi(y') = ky' \text{sen}(\alpha - kr) \quad (3.29)$$

A amplitude no n -ésimo obstáculo será [13]:

$$A(y') = \frac{\cos \delta + \cos \alpha}{2\sqrt{\lambda r}} H(y') e^{-jky' \text{sen} \alpha} \quad (3.30)$$

Usando (3.31) e (3.32), podemos reescrever (3.26) como

$$H_{n+1}(y) = \int_0^{\infty} A(y') e^{j\phi(y')} dy' \quad (3.31)$$

A solução de (3.31) resulta em funções lineares para a amplitude e fase, considerando intervalos discretos de integração iguais a Δ que, por consequência, conduzem a expressões relativamente simples. Estas são usadas na determinação dos campos eletromagnéticos incidentes em obstáculos sucessivos, devido ao fenômeno da difração. Para encontrar a parcela de ondas eletromagnéticas difratadas na direção do arruamento é necessário conhecer o nível de sinal total incidente no alto da construção imediatamente anterior ao ponto onde o móvel se localiza. De acordo com [13] pode-se notar uma redução considerável no nível de campo incidente na borda dos obstáculos para pequenos ângulos de incidência. Tal fato se deve ao aumento do efeito de sombreamento sobre um obstáculo $n+1$, provocado por um obstáculo n . Percebe-se também que a influência da difração nos primeiros obstáculos diminui à medida que n é incrementado, fazendo os níveis de campo eletromagnético alcançarem valores fixos que independem de n , quando este valor for suficientemente grande. Entretanto, deve-se tomar cuidado na escolha do número de obstáculos a serem contabilizados, devido ao elevado esforço computacional requerido.

3.2.1.3.1 Cálculo da Atenuação

O modelo desenvolvido em [13] é usado para calcular a atenuação média de percurso entre um sistema irradiante de uma ERB localizada acima da linha das construções e um equipamento móvel localizado no nível do arruamento. A atenuação de percurso pode ser calculada, pelo modelo proposto, por meio da atenuação em espaço livre, da redução de $Q(\alpha)$ no topo das construções devido à distância e do efeito da difração das ondas eletromagnéticas no topo das construções, redirecionando parte da energia incidente nestas para o nível do solo.

3.2.1.3.2 Atenuação em Espaço Livre

Desprezando o ganho da antenas transmissora da ERB, ou seja, supondo que a antena apresenta características de uma antena isotrópica, a relação entre a potência recebida em um determinado ponto e a potência transmitida, em espaço livre, é dada por $(\lambda/4\pi R)^2$. Expressando esta relação em dB resulta na expressão que permite calcular a atenuação em espaço livre, L_0 , em função da frequência, f , em MHz, e a distância, r , em km,

$$L_0 = 32,44 + 20 \log(f) + 20 \log(r). \quad (3.32)$$

3.2.1.3.3 Redução de $Q(\alpha)$

Por meio de (3.28)-(3.33), o valor de $Q(\alpha)$ pode ser calculado, expressando o campo incidente no topo das construções. Considerando $\alpha = 0$ e de acordo com [13], observa-se que a amplitude de sinal se reduz pela metade já no primeiro obstáculo ($n = 1$), seguindo uma relação logarítmica nos obstáculos subsequentes. Por meio da definição de α é possível contabilizar a inclinação do terreno devido à curvatura da terra. Para uma região que apresente inclinação leve, α , em radianos, pode ser calculado por

$$\alpha = \frac{H}{R} - \frac{R}{2R_e}, \quad (3.33)$$

na qual $R_e \approx 8,5 \cdot 10^3$ km e representa o raio efetivo da terra, R é a distância entre a ERB e a construção mais próxima ao móvel e H é a diferença, em metros, entre a altura do sistema irradiante da ERB e o topo das construções, conforme mostrado na Fig. 3.7.

3.2.1.3.4 Efeito da difração

O efeito da difração, que provoca o direcionamento de parte das ondas eletromagnéticas para o solo, dependerá do formato das construções próximas ao móvel. Uma simples aproximação deste processo é obtida considerando que a linha de edificações é composta por um único obstáculo plano, localizado exatamente na porção mediana da linha de edificações. Neste caso, a amplitude do sinal que chega ao móvel pode ser obtida por meio da multiplicação entre o nível de potência do sinal transmitido no topo do obstáculo (calculado por $Q(a)$) pelo seguinte fator K [13]:

$$K = \frac{\sqrt{\lambda}}{2\pi} \frac{1}{\left[\left(\frac{d}{2}\right)^2 + (h-h_m)^2\right]^{1/4}} \left[\frac{-1}{\gamma - \alpha} + \frac{1}{2\pi + \gamma - \alpha} \right] \quad (3.34)$$

na qual h é a altura das construções e h_m é a altura da antena do móvel, conforme indicado na Fig. 3.7. Os ângulos γ e α são dados em radianos e

$$\gamma = \tan^{-1} \left[\frac{2(h-h_m)}{d} \right]. \quad (3.35)$$

Reflexões de sinal nas construções próximas ao móvel, mostradas na Fig. 3.7, e outras fontes de percursos múltiplos são causadoras de desvanecimento rápido (*fast fading*) do sinal total recebido. Combinando (3.28)-(3.37), obtém-se a expressão que permite calcular a atenuação excedente, L_{ex} , em dB, entre um sistema de antenas de transmissão elevado e um ponto de recepção móvel, separados por uma distância r :

$$L_{ex} = 57,1 + A + \log(f) + 18 \log(r) - 18 \log(H) - 18 \log \left[1 - \frac{r^2}{17H} \right], \quad (3.36)$$

na qual H , conforme mostrado na Fig. 3.7, é dado em metros. A influência da geometria das construções é considerada no termo A , determinado por

$$A = 5 \log \left[\left(\frac{d}{2}\right)^2 + (h-h_m)^2 \right] - 9 \log d + 20 \log \left\{ \tan^{-1} \left[\frac{2(h-h_m)}{d} \right] \right\}, \quad (3.37)$$

na qual h , h_m e d são, respectivamente, a altura média das construções, altura média da antena do móvel e a distância entre as construções, conforme mostrado na Fig. 3.7.

A atenuação de potência total entre ERB e equipamento móvel, L_p , será a soma, em dB, da atenuação excedente (provocada pelo ambiente), calculada por (3.36) e (3.37), com a atenuação em espaço livre, L_0 , obtida por meio de (3.32),

$$L_p(\text{dB}) = L_0(\text{dB}) + L_{ex}(\text{dB}). \quad (3.38)$$

A potência recebida pelo equipamento móvel pode ser calculada subtraindo L_p da potência irradiada pela antena e acrescentando o ganho da antena, expresso em dBi ou dBd. Os gráficos relativos ao cálculo da atenuação prevista pelo modelo de Walfisch-Bertoni, em função da variação de outros parâmetros, são mostrados a seguir.

Em todos eles, obteve-se a atenuação de percurso *versus* distância, em dB, na Fig. 3.16, para diferentes condições de frequência; na Fig. 3.17, para diferentes condições de d ; na Fig. 3.18, para diferentes condições de H e na Fig. 3.19, para diferentes condições de h_m . Os demais parâmetros, usados no modelo, tiveram seus valores fixados e estão indicados na legenda de cada figura.

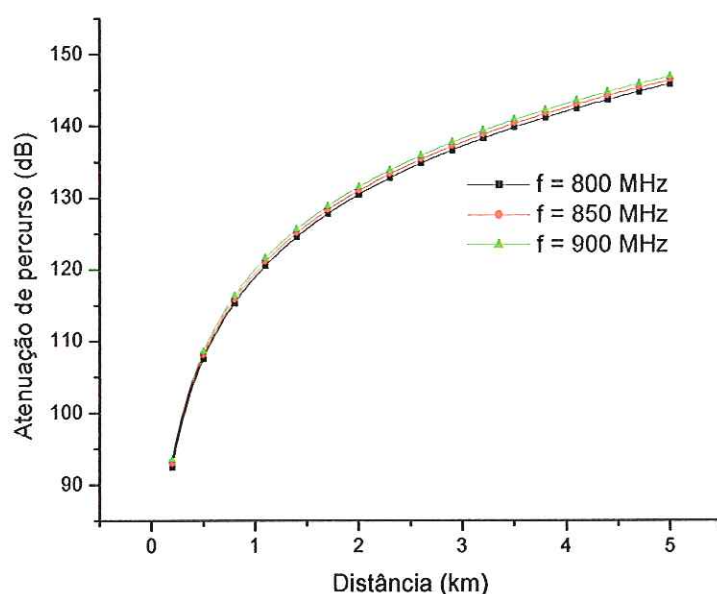


Figura 3.16. Cálculo da atenuação de percurso, entre ERB e móvel, por meio do modelo de Walfisch-Bertoni, para diferentes condições de frequência. Parâmetros usados na simulação: $d = 15\text{m}$; $h = 10\text{m}$, $h_m = 1,7\text{m}$, $H =$

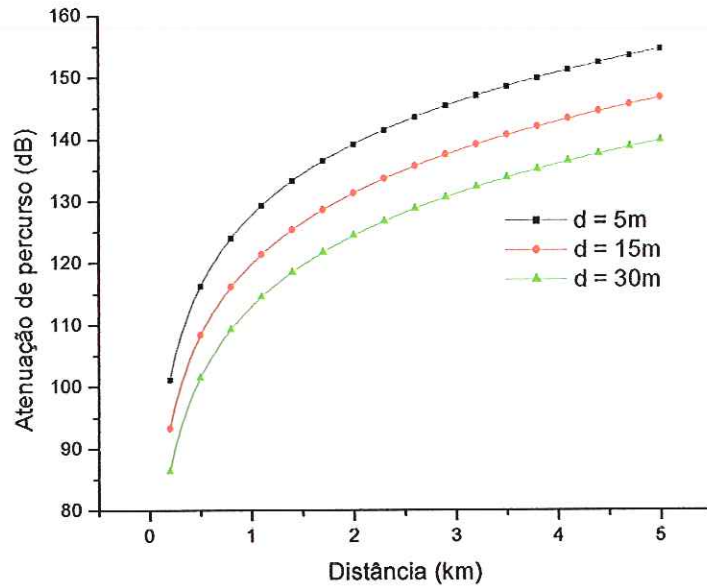


Figura 3.17. Cálculo da atenuação de percurso, entre ERB e móvel, por meio do modelo de Walfisch-Bertoni, para diferentes condições de d . Parâmetros usados na simulação: $f = 880\text{MHz}$; $h = 10\text{m}$, $h_m = 1,7\text{m}$, $H = 40\text{m}$.

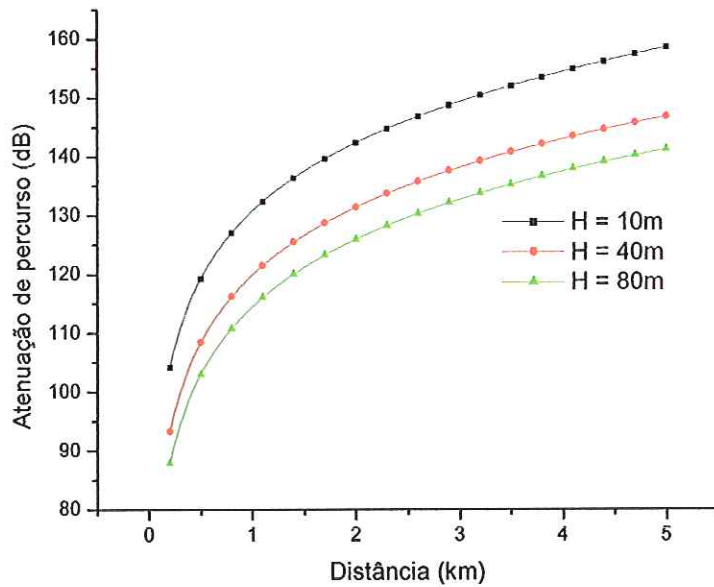


Figura 3.18. Cálculo da atenuação de percurso, entre ERB e móvel, por meio do modelo de Walfisch-Bertoni, para diferentes condições de H . Parâmetros usados na simulação: $f = 880\text{MHz}$; $h = 10\text{m}$; $h_m = 1,7\text{m}$; $d = 15\text{m}$.

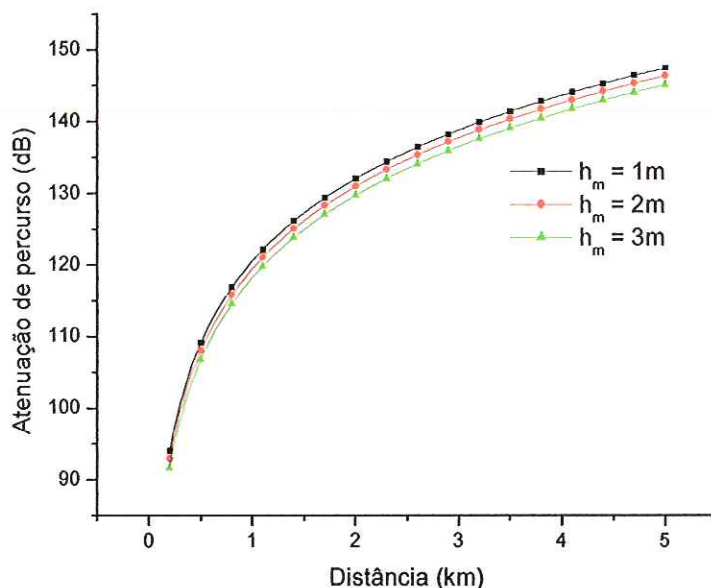


Figura 3.19. Cálculo da atenuação de percurso, entre ERB e móvel, por meio do modelo de Walfisch-Bertoni, para diferentes condições de h_m . Parâmetros usados na simulação: $f = 880\text{MHz}$; $h = 10\text{m}$; $H = 40\text{m}$; $d = 15\text{m}$.

3.2.1.4 Modelo de Ikegami

O modelo de Ikegami é semi-empírico, obtido para ambientes urbanos que apresentam características homogêneas em relação à densidade e altura das construções [14]. Para a obtenção da expressão que permite calcular a atenuação média de percurso foram empregados conceitos de óptica geométrica e teoria geral da difração, em uma região urbana ideal, com construções de espaçamento e altura uniformes. Neste contexto, uma situação de ausência de visada direta (*non line of sight*— NLOS) foi criada, sendo consideradas apenas duas trajetórias possíveis para as ondas eletromagnéticas que chegam ao ponto onde o móvel está. São elas a trajetória percorrida por ondas eletromagnéticas que sofreram difração no topo do obstáculo mais próximo ao ponto onde o móvel está, entre este e a ERB, e a trajetória proveniente da reflexão das ondas eletromagnéticas na edificação imediatamente posterior ao ponto analisado. Com base nestas considerações, a atenuação média devido ao percurso, em dB, pode ser calculada por:

$$L_p(\text{dB}) = 26,65 + 30\log(f) + 20\log(r) - 10\log\left[1 + \left(\frac{3}{h_r^2}\right)\right] - 10\log(W) + 20\log(h_b - h_r) + 10\log(\text{sen}\theta), \quad (3.39)$$

na qual W é a largura da rua onde se encontra o móvel, em metros; θ é o ângulo entre o eixo da rua na qual o móvel se encontra e a projeção horizontal da menor trajetória entre ERB e o móvel; e l_r é um parâmetro que depende do coeficiente de reflexão das paredes das construções. Normalmente, para a faixa de UHF, l_r apresenta valor típico de 3,2.

Os gráficos relativos ao cálculo da atenuação prevista pelo modelo de Ikegami, em função da variação de outros parâmetros, encontram-se a seguir.

Em todos eles, obteve-se a atenuação de percurso *versus* distância, em dB, na Fig. 3.20, para diferentes condições de frequência; na Fig. 3.21, para diferentes condições de W ; na Fig. 3.22, para diferentes condições de φ ; na Fig. 3.23, para diferentes condições de h_b e na Fig. 3.24, para diferentes condições de h_m . Os demais parâmetros, usados no modelo, tiveram seus valores fixados e estão indicados na legenda de cada figura.

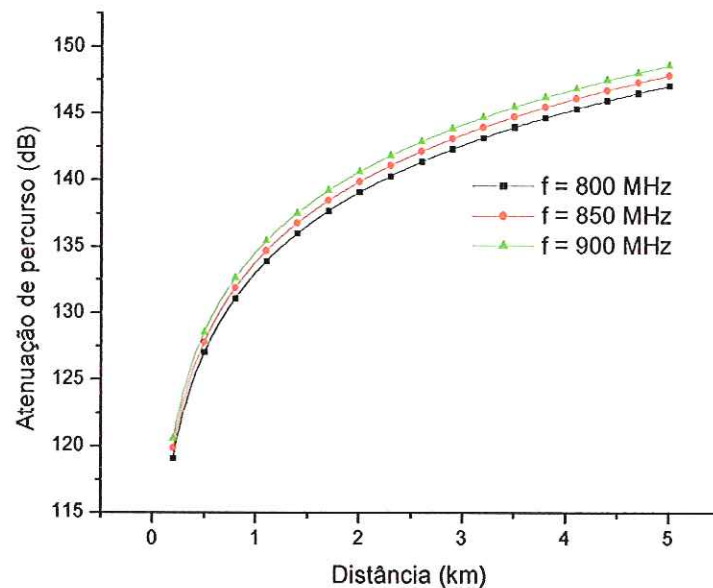


Figura 3.20. Cálculo da atenuação de percurso, entre ERB e móvel, por meio do modelo de Ikegami, para diferentes condições de frequência. Parâmetros usados na simulação: $W = 15\text{m}$; $\varphi = 45^\circ$; $h_b = 50\text{m}$; $h_m = 1,7\text{m}$.

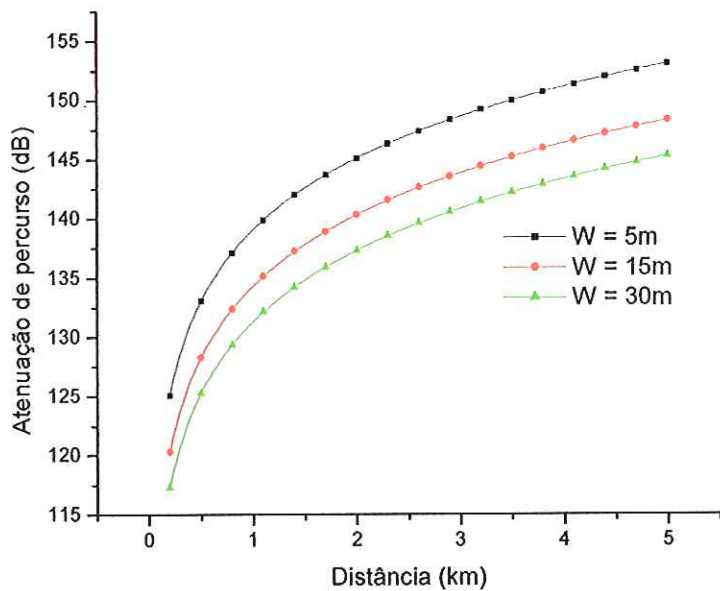


Figura 3.21. Cálculo da atenuação de percurso, entre ERB e móvel, por meio do modelo de Ikegami, para diferentes condições de W . Parâmetros usados na simulação: $f = 880\text{MHz}$; $\varphi = 45^\circ$; $h_b = 50\text{m}$; $h_m = 1,7\text{m}$.

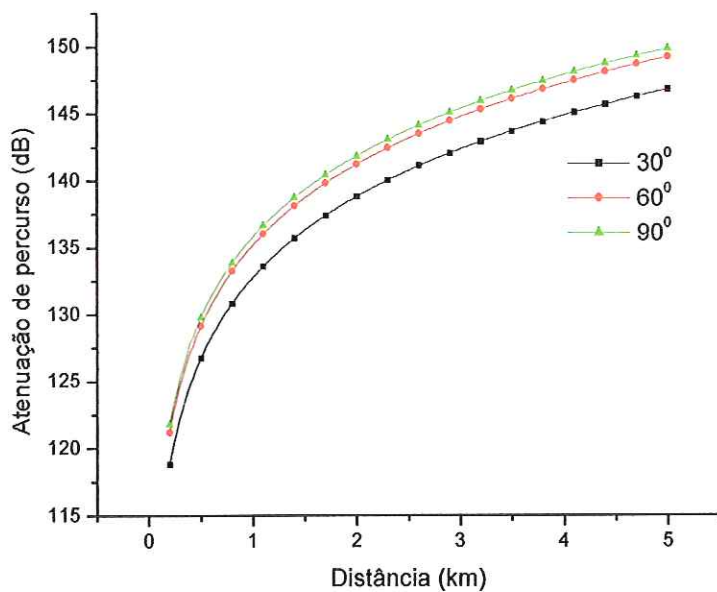


Figura 3.22. Cálculo da atenuação de percurso, entre ERB e móvel, por meio do modelo de Ikegami, para diferentes condições de φ . Parâmetros usados na simulação: $f = 880\text{MHz}$; $W = 15\text{m}$; $h_b = 50\text{m}$; $h_m = 1,7\text{m}$.

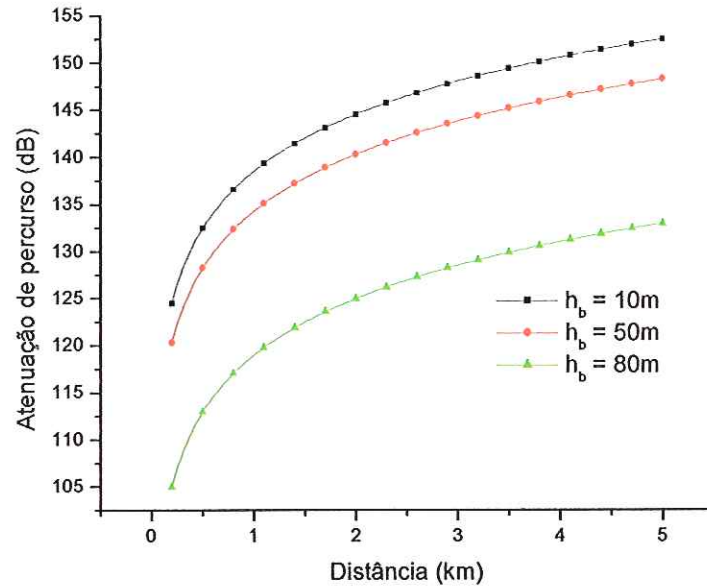


Figura 3.23. Cálculo da atenuação de percurso, entre ERB e móvel, por meio do modelo de Ikegami, para diferentes condições de h_b . Parâmetros usados na simulação: $f = 880\text{MHz}$; $W = 15\text{m}$; $\varphi = 45^\circ$; $h_m = 1,7\text{m}$.

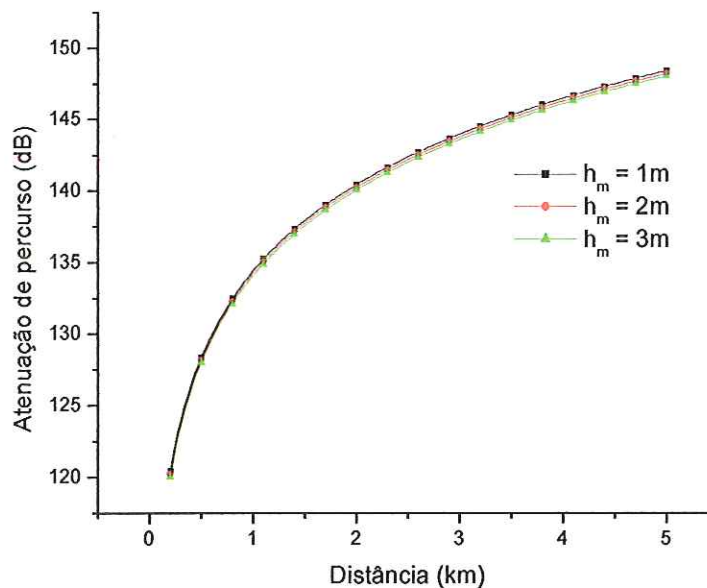


Figura 3.24. Cálculo da atenuação de percurso, entre ERB e móvel, por meio do modelo de Ikegami, para diferentes condições de h_m . Parâmetros usados na simulação: $f = 880\text{MHz}$; $W = 15\text{m}$; $\varphi = 45^\circ$; $h_b = 50\text{m}$.



3.2.1.5 Modelo de Walfisch-Ikegami

O modelo de Walfisch-Ikegami é semi-empírico, obtido a partir de alguns parâmetros urbanos, como a densidade e altura média das edificações e a largura das ruas do ambiente analisado. Este modelo se mostra eficiente nos casos em que a altura do sistema irradiante da ERB é menor que a altura média das construções. Nestes casos, existe considerável guiamento das ondas eletromagnéticas ao longo do arruamento [1]. O modelo de Walfisch-Ikegami prevê duas situações diferentes para cálculo da atenuação média de percurso entre a ERB e o móvel: situações de visada direta (LOS) entre ERB e equipamento móvel e ausência de visada direta (NLOS). Para propagação de sinais em ambientes urbanos e em condições de LOS entre ERB e móvel, a atenuação de percurso pode ser calculada por [1]:

$$L_p(LOS) = 42,6 + 20 \log(f) + 26 \log(r) \quad (3.40)$$

Para situações de NLOS, a atenuação de percurso pode ser calculada por

$$L_p(NLOS) = 32,4 + 20 \log(f) + 20 \log(r) + L(diff) + L(mult), \quad (3.41)$$

na qual $L(diff)$ representa a atenuação do sinal devido à difração do mesmo no topo da construção mais próxima ao móvel e $L(mult)$ é a atenuação devido à múltipla difração nas construções anteriores à edificação mais próxima do móvel.

A atenuação devido à difração no topo da construção mais próxima do móvel pode ser calculada por [12]

$$L_{diff} = -16,9 - 10 \log(W) + 10 \log(f) + 20 \log(h_r - h_m) + L_\theta, \quad (3.42)$$

na qual h_r é a altura média das construções, em metros, e L_θ é a atenuação devido ao ângulo de elevação θ , medido entre a horizontal e a linha que liga o móvel à ERB. L_θ pode ser calculado por meio das expressões dadas na tabela 3.5.

Tabela 3.5. Condições para cálculo de L_θ .

Condição	Expressão para cálculo de L_θ
$(0 \leq \theta < 35^\circ)$	$-10 + 0,3571 \cdot \theta$
$(35^\circ \leq \theta < 55^\circ)$	$2,5 + 0,075[\theta - 35^\circ]$
$(55^\circ \leq \theta \leq 90^\circ)$	$4 - 0,11[\theta - 55^\circ]$

A atenuação devido às múltiplas difrações nas edificações é definida por [1]:

$$L_{multi} = K_0 + K_a + K_d \log(r) + K_f \log(f) - 9 \log(W), \quad (3.43)$$

na qual K_0 , K_a , K_d e K_f são coeficientes calculados a partir da altura da ERB, da altura do móvel e da frequência de operação. As expressões para cálculo dos parâmetros K_i ($i=0, a, d, f$) são dado na tabela 3.6.

Tabela 3.6. Condições para o cálculo dos coeficientes K_0 , K_a , K_d e K_f .

Parâmetro	Expressão para cálculo
K_0	$-18 \log[1 + (h_b - h_r)]$
K_a	$54(h_b \geq h_r)$ $54 - 0,8[h_b - h_r](h_b < h_r; r \geq 0,5km)$ $54 - 0,4[h_b - h_r](r < 0,5km)$
K_d	$18(h_b \geq h_r)$ $18 - \left\{ \frac{15(h_b - h_r)}{h_r} \right\} (h_b < h_r)$
K_f	$K_f = -4 + K_{fl} \left[\left(\frac{f}{925} \right) - 1 \right]$

O fator K_{fl} é 1,5 para grandes centros metropolitanos e 0,7 para as outras situações. Os gráficos relativos ao cálculo da atenuação prevista pelo modelo de Walfisch-Ikegami, em função da variação de outros parâmetros, são mostrados a seguir.

Em todos eles, obteve-se a atenuação de percurso *versus* distância, em dB, na Fig. 3.25, para diferentes condições de frequência; na Fig. 3.26, para diferentes condições de W ; na Fig. 3.27, para diferentes condições de θ ; na Fig. 3.28, para diferentes condições de h_r e na Fig. 3.29 para diferentes condições de h_m . Os demais parâmetros, usados no modelo, tiveram seus valores fixados e estão indicados na legenda de cada figura.

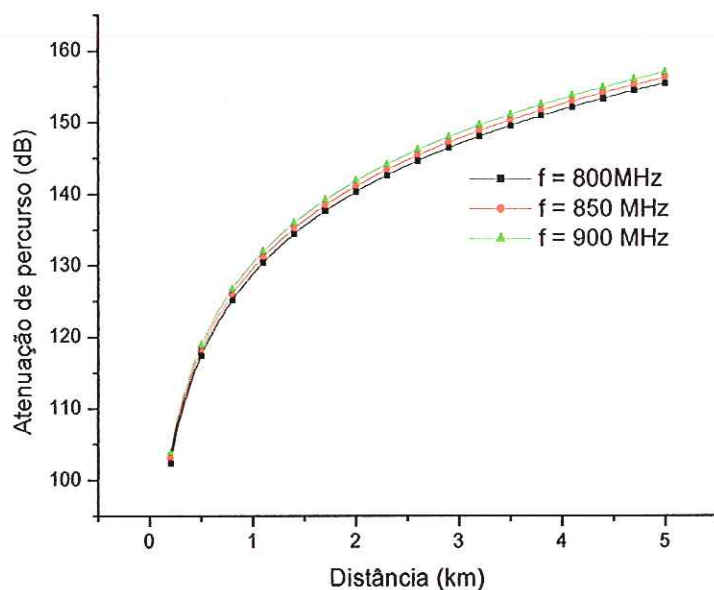


Figura 3.25. Cálculo da atenuação de percurso, entre ERB e móvel, por meio do modelo de Walfisch-Ikegami sem linha de visada direta (L_{PNLOS}), para diferentes condições de frequência. Parâmetros usados na simulação: $W = 15\text{m}$; $h_r = 10\text{m}$; $h_m = 1,7\text{m}$; $\theta = 45^\circ$; $h_b = 50\text{m}$.

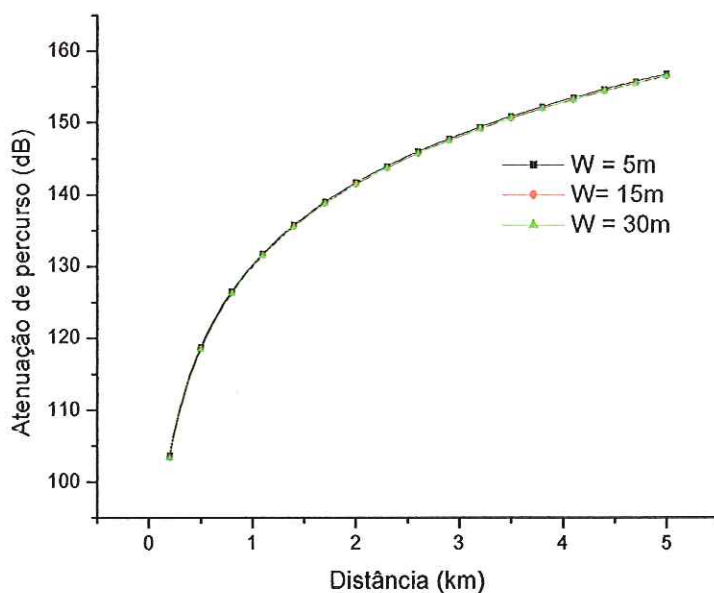


Figura 3.26. Cálculo da atenuação de percurso, entre ERB e móvel, por meio do modelo de Walfisch-Ikegami sem linha de visada direta (L_{PNLOS}), para diferentes condições de W . Parâmetros usados na simulação: $f = 880\text{MHz}$; $h_r = 10\text{m}$; $h_m = 1,7\text{m}$; $\theta = 45^\circ$; $h_b = 50\text{m}$.

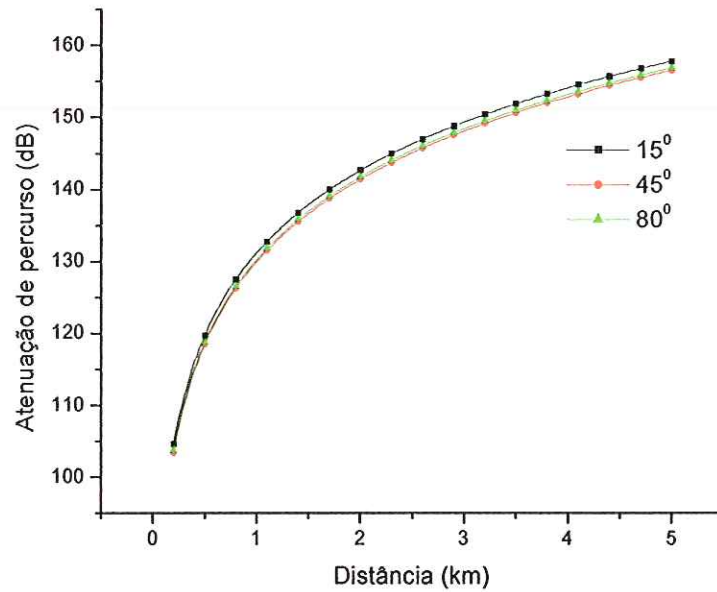


Figura 3.27. Cálculo da atenuação de percurso, entre ERB e móvel, por meio do modelo de Walfisch-Ikegami sem linha de visada direta ($L_{p_{NLOS}}$), para diferentes condições de θ . Parâmetros usados na simulação: $f = 880\text{MHz}$; $h_r = 10\text{m}$; $h_m = 1,7\text{m}$; $h_b = 50\text{m}$; $W = 15\text{m}$.

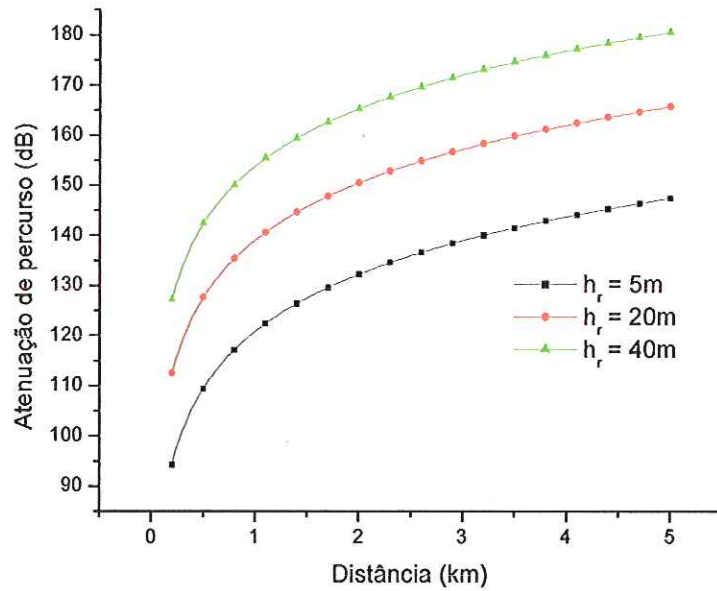


Figura 3.28. Variação da atenuação no percurso entre ERB e móvel com a distância, por meio do modelo de Walfisch-Ikegami sem linha de visada direta ($L_{p_{NLOS}}$), para diferentes condições de h_r . Parâmetros usados na simulação: $f = 880\text{MHz}$; $h_m = 1,7\text{m}$; $\theta = 45^\circ$; $h_b = 50\text{m}$; $W = 15\text{m}$.

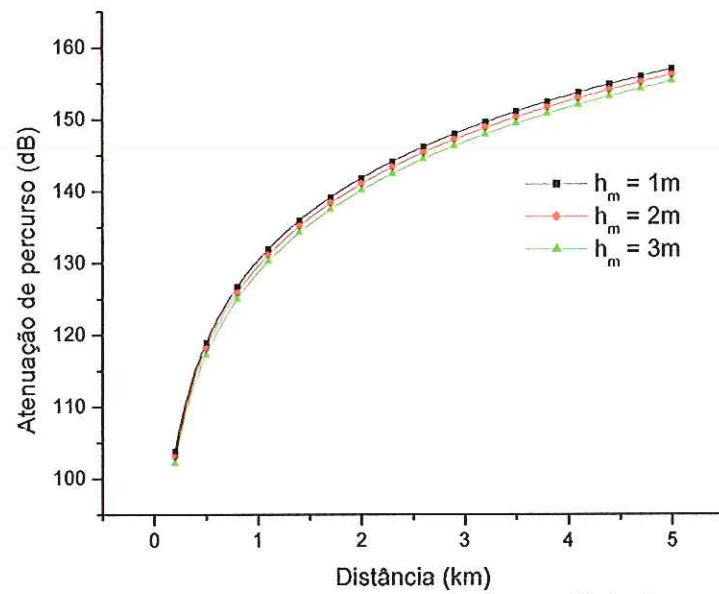


Figura 3.29. Variação da atenuação no percurso entre ERB e móvel com a distância, por meio do modelo de Walfisch-Ikegami sem linha de visada direta ($L_{p_{NLOS}}$), para diferentes condições de h_m . Parâmetros usados na simulação: $f = 880\text{MHz}$; $\theta = 45^\circ$; $h_b = 50\text{m}$; $W = 15\text{m}$; $h_r = 10\text{m}$.

Capítulo 4

As medições realizadas na cidade de Conceição das Alagoas, MG, têm como objetivo comparar os níveis de potência recebida pelo equipamento móvel, determinados a partir de modelos, com valores medidos. Algumas informações da ERB local necessárias à predição, como tipos de cabo e antena e altura de torre, foram obtidas do projeto da estação local [30]. Entretanto, as medidas de outras características, como potência entregue ao sistema irradiante e frequência de operação, exigiam a interrupção de grande parte das funcionalidades da ERB, como o bloqueio de todos os canais de voz. Após alguns contatos feitos com a equipe operacional da CTBC Celular— regional de Uberaba— foi consensualmente acordado que estes testes deveriam ser executados em dias de baixo tráfego, preferencialmente no período noturno, e que a portadora de teste usada seria a mesma do canal de controle analógico da estação. O nível de sinal recebido pelo móvel em ambiente *outdoor* foi medido por meio de um veículo de teste pertencente à operadora. Os equipamentos deste veículo relacionam, em uma frequência pré-definida, a potência recebida em um ponto com a sua respectiva coordenada geográfica, coletada por meio de um equipamento GPS. A descrição do ambiente analisado, no caso a cidade de Conceição das Alagoas, MG, detalhes dos equipamentos, metodologia adotada nas medidas de cobertura e resultados das medidas são apresentados neste capítulo.

4.1 A Cidade Conceição das Alagoas, MG

A cidade de Conceição das Alagoas, MG, com uma população de 17.147 habitantes [31], está localizada no triângulo mineiro, próxima das cidades Campo Florido (30 km), Planura (47 km) e Uberaba (58 km). No que diz respeito ao serviço móvel celular, existe na localidade apenas cobertura da empresa CTBC Celular S.A., operando na banda A com tecnologias analógica (AMPS) e digital (TDMA). Há apenas uma estação rádio-base, localizada à rua Benedito Lima 1.355, bairro dona Marruca, próxima da Associação Atlética Banco do Brasil (AABB) e da lagoa do Veado. A área urbana mostra uma grande

regularidade em relação ao arruamento, com cruzamentos perpendiculares em toda extensão urbana. A região é essencialmente residencial, sendo que as construções apresentam um ou dois andares, baixa densidade de ocorrência e regularidade na distribuição. Estas características permitem classificar o ambiente de Conceição das Alagoas, em termos de radiopropagação, como ambiente suburbano [11]. A topografia urbana é, em sua maioria, plana. Todas estas características facilitam a análise dos efeitos do diagrama de irradiação da antena envolvida, assim como a predição por meio dos modelos estudados. Além disso, a inexistência de reuso de frequências e de concorrência (banda B) tornam o espectro eletromagnético na região bastante imune a ruídos, oriundos de interferências do tipo cocanal e de canal adjacente, na faixa de frequências analisada. As evidências apresentadas tornam a cidade de Conceição das Alagoas uma área propícia à análise teórica de cobertura celular baseada em modelos de propagação empíricos e semi-empíricos, dada a dimensão da área analisada (macrocélula). Com isso, justifica-se o uso dos modelos de propagação descritos nos capítulos anteriores. Quanto à configuração, a ERB local é de fabricação da empresa Ericsson, modelo RBS 882, com transceptores analógicos e digitais. A torre é estaiada (cabos de aço instalados lateralmente, para aumentar a resistência ao tombamento), de seção transversal quadrada e com 68,8 metros de altura. São usados dois canais de controle: um deles analógico, de número 328 e o outro digital, de número 1015 (conforme tabela de canais adotada pela operadora). Outras informações técnicas relativas à estação utilizada nos testes são apresentadas a seguir.

4.2 Equipamentos usados e metodologia de trabalho

Devido às limitações impostas para a interrupção da ERB, ficou decidido que os testes e medições seriam realizados em uma segunda-feira, dia 27 de janeiro de 2003, após as 23 horas. Desta forma, os impactos decorrentes da interrupção do equipamento foram minimizadas. Foram usados nestas medidas os seguintes equipamentos, descritos na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Equipamentos usados nas medições de campo.

Equipamentos e descrição	Utilização
<i>Cell site test set</i> modelo 8921 A, fabricado pela Hewlett Packard (HP) [41], de propriedade da CTBC Celular	Medição de potência e frequência da portadora de teste;
Veículo de teste (<i>drive-test</i>), também de propriedade da CTBC Celular, equipado com equipamento de coleta RSAT 2000-IS 136, fabricado pela LCC [42]. A adaptação deste equipamento ao veículo foi feita pela empresa RFCOM, localizada em São José dos Campos	Levantamento da cobertura do canal de controle (nível de sinal em dBm versus coordenada geográfica)
GPS III versão Américas, Fabricado pela Garmin [43].	Medição de coordenadas de alguns pontos importantes da área analisada (ruas)
Equipamento de medição de VSWR/ <i>return loss</i> modelo Site Máster, fabricado pela Anritsu [44].	Usado na verificação das condições do sistema irradiante, em relação a possíveis descasamentos de impedância entre cabos e antena.

Outras informações necessárias à execução do estudo foram obtidas diretamente do módulo C (memorial descritivo e projeto da ERB), existente na estação. Estas informações são mostradas na Tabela 4.2.

A medição da potência entregue pela ERB ao sistema irradiante e da frequência de operação foram feitas no acoplador de saída de sinal para as antenas. Desta forma, são desprezadas as atenuações decorrentes da propagação do sinal, proveniente dos transceptores, através das estruturas internas do equipamento (combinadores, derivações, cavidades ressonantes, etc). O canal utilizado nos testes foi o de controle analógico usado na região, número 328 (de acordo com o modelo de alocação de canais adotado pela operadora). A interrupção da estação rádio-base aconteceu exatamente às 23:15 horas. As medidas foram feitas por meio do equipamento HP 8921A, no modo analisador de RF (*RF analyzer*). Os resultados das medições são mostrados na Tabela 4.3. Imagens da ERB usada pela operadora, assim como da topografia da localidade estudada e equipamentos utilizados nos testes são apresentadas na Fig. 4.1.

Optamos por usar a portadora do canal de controle como frequência de teste porque os testes deveriam ser realizados no menor intervalo de tempo de interrupção dos transceptores da ERB, de forma que os indicadores de qualidade da operadora, em relação à taxa de bloqueio de canais, não fossem afetados. Com isso, em vez de optarmos por bloquear um transceptor para configurar uma portadora específica para teste, decidimos por usar a portadora do canal de controle, uma vez que é irradiada pela ERB a todo o tempo.

Usamos o canal analógico devido a uma limitação na medição de potência observada na ERB. Uma vez que usamos a portadora de *downlink* do canal de controle, necessitávamos medir o nível de potência desta, quando modulada em FSK (condição de operação normal do canal de controle analógico e de realização das medições por meio do veículo de teste). Por meio de comandos na ERB, pode-se gerar apenas a portadora de controle analógica modulada, para a medição de potência por meio do equipamento HP 8921 A. Tal fato não pode ser feito para a portadora de controle digital (modulada em $\pi/4$ DQPSK).

Tabela 4.2. Informações obtidas a partir do projeto da estação (módulo C).

Equipamentos e descrição da utilização	Descrição do equipamento
Tipos de cabos utilizados na condução dos sinais de RF dos transceptores até as antenas	Cabo coaxial tipo FEEDER, 7/8", modelo SXA 105-3061
Comprimento do cabo usado na instalação	85 m
Tipo de antenas utilizadas	Modelo BCD 80010 B (omnidirecional), fabricadas pela Antel
Número de conectores utilizados	3
Tipo de conectores utilizados	Conectores tipo N
Coordenadas da estação	19055'45" S; 48022'37" W
Altitude	513 m (em relação ao nível do mar)
Altura da torre	68,8 m
Potência de saída dos transceptores	25 W

Tabela 4.3. Resultado das medições com o equipamento HP 8921A.

Medida	Valor
Potência entregue ao sistema irradiante	13,6 W
Frequência de teste	879,84 MHz (correspondente à frequência de <i>downlink</i> para o canal de controle 328)

Em seguida, foi iniciada a etapa de medida de cobertura *outdoor* da portadora de teste usada na região urbana da localidade. Para a execução desta tarefa foi usado o veículo de teste. Devemos esclarecer que, neste estudo, os níveis de potência recebidos pelo equipamento móvel em ambientes *indoor* não puderam ser verificados por causa do sistema de antenas *outdoor* da ERB, dado à indisponibilidade no local de equipamentos de medição e registro apropriados a esta tarefa (*walk-test*).

Devido à regularidade apresentada pelo arruamento da região urbana, a amostragem de cobertura foi feita em quatro vias diferentes, conforme mostra a Fig. 4.2. As vias percorridas foram a rua Benedito Lima, na qual está localizada a estação da operadora; rua Jesus Marques Prata, via localizada à direita da rua Benedito Lima; rua Tupis, localizada à

esquerda da rua Benedito Lima e rua da Saudade, perpendicular a todas as vias anteriores, localizada, aproximadamente, 1,4 km da estação. Para cada uma das vias citadas foram registrados arquivos de cobertura separados, permitindo uma análise individual de cada uma. A escolha das vias indicadas foi justificada pela necessidade de se obter amostras de cobertura provenientes de ambos os lados da estação da operadora, assim como de vias mais afastadas e perpendiculares em relação às primeiras. O objetivo foi evidenciar efeitos previstos em alguns modelos estudados, como difração no topo das edificações. Analisando as ruas envolvidas, observamos que a topografia deixava de ser plana (apresentando certa declividade) para distâncias superiores a 1,5 km, tomadas a partir da ERB. Sendo assim, foram coletadas amostras de sinal em distâncias inferiores ao limite acima, pois este fato dificultaria a obtenção de alguns parâmetros necessários à manipulação dos modelos. Além disso, alguns dos modelos estudados, por definição, devem ser usados em regiões planas (modelos de Lee e Okumura-Hata) [10] [12]. Os arquivos gerados, referentes aos dados coletados pelo equipamento adaptado ao veículo de teste, podem ser armazenados em dois formatos. Um deles é compatível apenas com as ferramentas de visualização existentes no mercado, como os softwares CMA [42], Deskat [45], Celplanner [33], entre outros. A outra opção de armazenamento é no formato texto (.txt), facilitando a manipulação das informações por meio de ferramentas computacionais convencionais, como Excel [46] e Origin [47]. Utilizando este formato, é fornecido o nível de sinal do canal analisado, em dBm, relacionado com a coordenada geográfica dos pontos onde a medição foi efetuada. A Tabela 4.4 mostra os dados gerados na coleta efetuada ao longo da rua Benedito Lima.

Com as coordenadas geográficas dos pontos onde as medições de campo foram feitas, assim como das coordenadas geográficas da torre, outros parâmetros necessários à execução dos modelos foram obtidos. Exemplos destes parâmetros são a menor distância entre estação e ponto de medição, o ângulo entre o eixo da rua analisada e a linha reta que une o ponto de medição à estação, e o ângulo entre a linha de visada da antena para o ponto analisado e o horizonte da mesma. Estes, por sua vez, foram obtidos por meio de geometria plana, para cada ponto considerado. A regularidade do arruamento da região analisada e a topografia local plana facilitaram a análise.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 4.1. Imagens relacionadas às atividades realizadas na cidade de Conceição das Alagoas, mostrando em a) a regularidade da topografia da região, assim como as características suburbanas do ambiente estudado; b) a edificação da operadora onde se encontra a ERB; c) ERB modelo RBS 882, fabricante Ericsson, usada pela CTBC Celular na prestação de serviço móvel à localidade; d) indicação do conector de junção entre o rabicho (*jumper*) proveniente da ERB e o cabo alimentador das antenas (*feeder*), onde foi realizada a medição da potência que a ERB entrega efetivamente ao sistema irradiante; e) veículo de teste (*drive-test*), de propriedade da CTBC Celular, usado no levantamento de cobertura da portadora de teste ao longo do arruamento e f) equipamento *cell site test set 8921A*, fabricado pela Hewlett Packard (HP), usado na medição de potência e frequência no ponto indicado em (d). Características (modo analisador de RF): faixa de medição em frequência: 400 MHz a 1000 MHz; faixa de medição em potência: 1 mW a 60 W; precisão (medição de potência): +/- 5% [41].

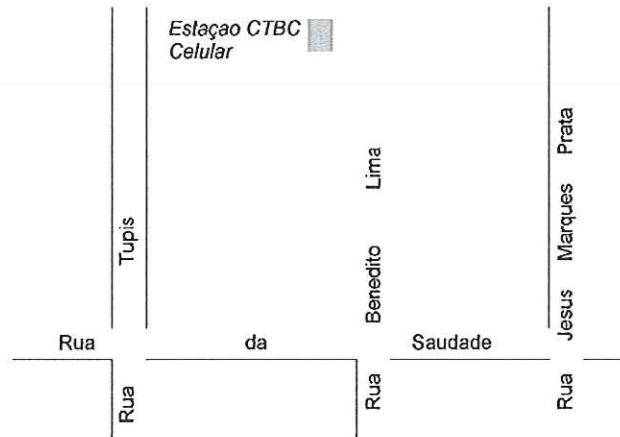


Figura 4.2. Vias selecionadas para coleta de dados relativos à cobertura de sinal, proveniente do canal de controle 328, usado pela estação da CTBC Celular indicada.

Tabela 4.4. Tabela gerada pelo equipamento RSAT 2000 (CTBC Celular), durante coleta de dados referente à cobertura do canal 328 ao longo da rua Benedito Lima, mostrando o formato de aquisição dos dados (nível de sinal X coordenada geográfica do ponto analisado). A coluna RSSI (*received signal strength indication*) mostra o nível de potência recebida, no ponto analisado, em dBm.

ARQUIVO: C:\COLLECTUNIUBE2.DAT

Hora	Latitude		Longitude		Distância (milhas)	Azim. (graus)	Canal	Tipo	RSSI (dBm)
00:53:11	19°55'42"	S	48°22'39"	W	0.30	153.39	328	AMPS	-50
00:53:14	19°55'42"	S	48°22'39"	W	0.30	153.39	328	AMPS	-50
00:53:17	19°55'42"	S	48°22'39"	W	0.30	153.39	328	AMPS	-51
00:53:20	19°55'42"	S	48°22'39"	W	0.30	153.39	328	AMPS	-51
00:53:23	19°55'42"	S	48°22'39"	W	0.30	153.39	328	AMPS	-51
00:53:27	19°55'42"	S	48°22'39"	W	0.30	153.39	328	AMPS	-51
00:53:30	19°55'42"	S	48°22'39"	W	0.30	153.39	328	AMPS	-50
00:53:33	19°55'42"	S	48°22'39"	W	0.29	153.40	328	AMPS	-51
00:53:36	19°55'42"	S	48°22'39"	W	0.28	153.54	328	AMPS	-50
00:53:39	19°55'41"	S	48°22'40"	W	0.27	153.71	328	AMPS	-52
00:53:42	19°55'40"	S	48°22'40"	W	0.25	153.88	328	AMPS	-58
00:53:45	19°55'40"	S	48°22'41"	W	0.24	154.04	328	AMPS	-69

É preciso dizer, entretanto, que a investigação teórica feita por meio dos modelos de propagação permaneceria inalterada caso o arruamento da região analisada não apresentasse a regularidade observada. A dificuldade adicional nestes casos refere-se à obtenção de alguns parâmetros, como ângulos necessários para uso nos modelos, dada a falta de um referencial cartesiano natural e plano. Nestas situações, a determinação destes parâmetros seria possível mediante análises matemáticas mais complexas da região estudada. Como exemplo, na Fig. 4.3 é apresentada a metodologia usada para o cálculo do ângulo entre a projeção horizontal da linha de visada entre a antena e o ponto analisado e o eixo da rua

envolvida. Este ângulo é usado na análise teórica feita pelo modelo semi-empírico de Ikegami [14].

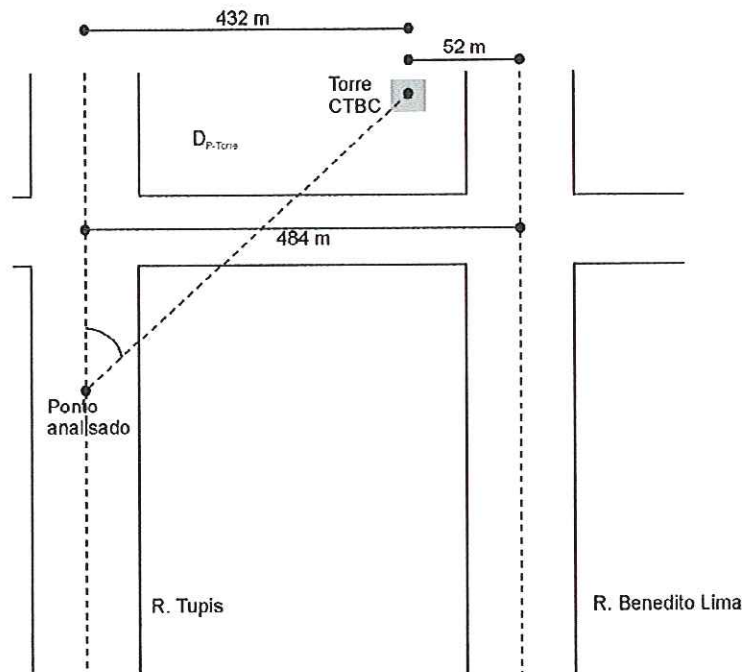


Figura 4.3. Cálculo do ângulo (θ) formado entre a projeção horizontal da menor trajetória do ponto analisado à torre transmissora e o eixo da rua envolvida.

Pela Fig. 4.3 pode-se calcular o ângulo θ formado entre a trajetória direta do o ponto analisado para a torre e o eixo da rua envolvida, usando geometria plana, aplicada ao triângulo retângulo,

$$\theta = \arcsen\left(\frac{432}{D_{P-Torre}}\right) \quad (4.1)$$

A distância entre o ponto e a torre, $D_{P-Torre}$, pode ser calculada a partir das coordenadas geográficas dos pontos envolvidos. A distância geodésica entre dois pontos é dada por [48]

$$\cos(s) = [\text{sen}(\varphi_2) \cdot \text{sen}(\varphi_1)] + [\cos(\varphi_2) \cdot \cos(\varphi_1) \cdot \cos(\Delta\lambda)] \quad (4.2)$$

na qual φ_1 e φ_2 são as latitudes dos pontos e $\Delta\lambda$ é a diferença entre a longitude dos pontos. O resultado obtido na eq. (4.2) deve ser multiplicado pelo raio da terra, para que se tenha o resultado esperado.

Com base nestas informações, para cada ponto onde o nível de potência foi coletado por meio do veículo de teste, foi feito o cálculo do ângulo θ . Este ângulo foi contabilizado

em (3.39) sendo, assim, possível calcular a atenuação do ambiente urbano relacionado, segundo Ikegami.

Além da menor distância entre ERB e equipamento móvel, frequência de operação e altura da antena de transmissão da ERB, outros parâmetros, também obtidos no local e necessários à simulação dos modelos apresentados, são mostrados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5. Parâmetros medidos, usados nos demais modelos.

Parâmetro	Abrangência em relação à região analisada	Valor medido (m)
Altura média das construções (h)	Geral	4
Altura da antena do móvel (h_m)	Geral	1,7
Distância média entre as construções (W)	Geral	12
Ângulo de elevação, medido entre o solo e a linha direta que liga ERB ao móvel (δ)	Próprio de cada ponto	-

O ganho da antena de transmissão usada na ERB também é necessário para a simulação dos modelos. No caso analisado, a antena usada é um modelo onidirecional, com $1,25^\circ$ de *downtilt* elétrico. Nesta, a direção de máxima irradiação não coincide com a linha horizontal que passa pelo meio da antena (também conhecida como “horizonte da antena”), mas está $1,25^\circ$ abaixo desta linha imaginária. A Fig. 4.4 ilustra exemplos de antenas onidirecionais com e sem *downtilt* elétrico.

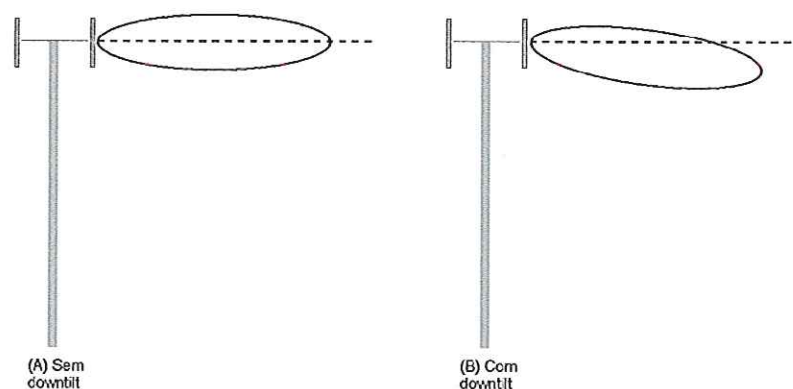


Figura 4.4. Diagrama de irradiação vertical de antena onidirecional, mostrando ausência (A) e presença (B) de *downtilt* elétrico.

O ganho da antena usada na estação é 10 dBd^1 [32]. Entretanto, esta informação se refere ao máximo ganho da antena, obtido $1,25^\circ$ abaixo da linha de horizonte da mesma (devido à existência do *downtilt*). Em diferentes direções, o ganho observado no diagrama vertical apresentado pela antena é diferente do valor fornecido para a direção de máximo ganho. Tal fato é ilustrado na Fig.4.5.

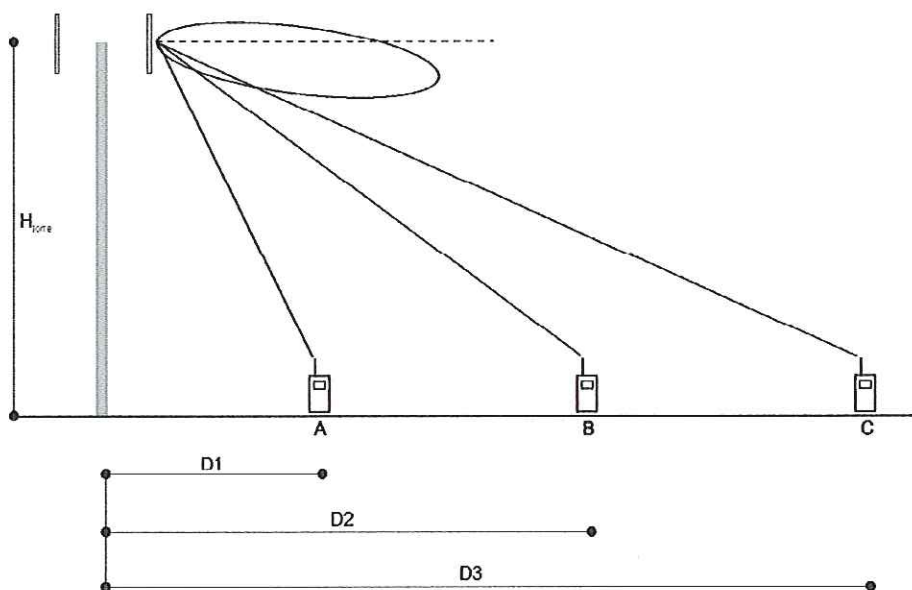


Figura 4.5. Diferença do ganho vertical de uma antena isotrópica em função da posição do móvel em relação à torre transmissora. Nota-se que à medida que o móvel se afasta da torre transmissora (pontos A, B e C), a linha de visada direta encontra o diagrama de irradiação da antena transmissora em regiões de maior ganho, tendendo ao valor máximo, de 10 dBd , por sua vez obtido na região de máxima irradiação do diagrama mostrado.

Assim, foi necessário conhecer as características do ganho da antena usada em função do ângulo de elevação e em relação ao horizonte desta. Estas informações foram obtidas do fabricante e são apresentadas na Tabela 4.6 [32]. Conhecidas estas características, foi possível incluir, de maneira diferenciada, o ganho da antena usada, para cada ponto analisado, tornando o valor teórico do nível de sinal recebido pelo móvel mais próximo do valor medido em campo. A redução do desvio (percentual e em dB) entre valores teóricos e reais, proposta por meio de análise diferenciada do ganho da antena *versus* ponto analisado, foi verificada nas simulações feitas sem inclusão do ganho da antena e com a inclusão deste. Os resultados são mostrados a seguir.

¹ Ganho, na direção de máxima irradiação de potência, da antena usada, em relação ao máximo do diagrama de irradiação do dipolo. Este, por sua vez, apresenta um ganho de $2,15 \text{ dBi}$ (em relação à antena isotrópica) na sua direção de máxima irradiação.

Tabela 4.6. Características de ganho (dBd) versus ângulo de elevação (incrementos de 1°) da antena BCD 80010 – Fabricante Antel.

Parâmetro	Especificação
Modelo	BCD80010
Fabricante	Antel
Descrição	Onidirecional, 1,25 <i>downtilt</i>
Ganho nominal	10,00 dBd
Ângulo de abertura horizontal	360,00°
Ângulo de abertura vertical	8,30°
Frequência mínima de operação	800.00 MHz
Frequência máxima de operação	900.00 MHz
Dimensão	3,45 m
0,0	9,91
1,0	9,91
2,0	9,37
3,0	8,59
4,0	7,25
5,0	5,62
6,0	4,34
7,0	0,63
8,0	-1,06
9,0	-2,04

O nível de potência recebida pelo móvel foi obtido a partir de [10]

$$P_{móvel} = P_{ERP} + G_{ant(p)} - L_{meio}, \quad (4.3)$$

na qual P_{ERP} é a potência efetivamente irradiada pela antena, em dBm; $G_{ant(p)}$ é o ganho da antena, em relação ao ponto analisado, em dBd; e L_{meio} é a atenuação provocada pelo meio de transmissão, calculada por meio dos modelos de propagação estudados, em dB. A potência P_{ERP} foi obtida por meio de

$$P_{ERP} = P_T - (L_{conectores} + L_{FEEDER} + L_{rab.ant.}), \quad (4.4)$$

na qual P_T é a potência que a ERB entrega ao sistema irradiante, em dBm; $L_{conectores}$ é a atenuação devido aos conectores, em dB; L_{FEEDER} é a atenuação causada pelo cabo alimentador das antenas (*feeder 7/8''*), em dB; e $L_{rab.ant.}$ é a atenuação causada pelo trecho de cabo (rabicho) de 3m, usado na conexão desta com o cabo *feeder* proveniente do equipamento.

Foi adotada atenuação de 0,3 dB por conector na faixa de frequências em questão. Na situação analisada são utilizados 3 conectores, a saber: transição rabicho ERB para cabo *feeder*, transição cabo *feeder* para rabicho da antena e conector de entrada da antena. Assim, a atenuação causada por estes elementos é próxima de 1 dB. As atenuações devido ao cabo *feeder 7/8''* e ao rabicho de conexão com a antena (1/2'') foram calculadas a partir dos

comprimentos de cabo utilizados. Estas informações foram obtidas em folha de dados do módulo C, existente na estação, e de dados relativos à atenuação destes tipos de cabos na faixa de frequências analisada, fornecidos pelos fabricantes [33]. Os valores são: 82 metros de cabo *feeder* 7/8"; 3 metros de rabicho 1/2"; 4,3 dB/100 m de atenuação para cabos 7/8" (820 MHz a 960 MHz); e 7,7 dB/100 m de atenuação para cabos 1/2" (820 MHz a 960 MHz). Portanto, as atenuações obtidas para os cabos utilizados foram $L_{FEEDER} = 3,526$ dB e $L_{rab.ant} = 0,231$ dB. Com estes valores e por meio de (4.4) obteve-se uma P_{ERP} igual a 36,5783 dBm, ou 4,548 W. Na Equação (4.3) foi usado o valor obtido em dBm. O ganho da antena, usado em (4.3), é função do ponto analisado, variando em cada caso. Como os dados relativos ao ganho da antena em função do ângulo de elevação, obtidos de dados do fabricante, são expressos em passos de 1° , foram feitas aproximações de ganho para os valores de elevação fracionários obtidos, de forma a se manter uma maior coerência com o padrão de ganho da antena. Sendo assim, para cada informação de cobertura feita com o equipamento de teste, foram feitas simulações utilizando cada um dos modelos estudados, considerando as particularidades de cada um (obtidas por meio de análise da coordenada geográfica do ponto analisado em relação à torre e do emprego das teorias da geometria plana). O objetivo foi obter, para cada modelo, o nível estimado de potência recebido pelo móvel, em cada ponto de cobertura analisado. Com isso, foram feitas comparações entre os modelos estudados e os dados reais de cobertura para cada ponto coletado, sendo possível avaliar o desempenho de cada modelo frente ao nível real de cobertura obtido.

Foram feitos dois tipos de simulações em relação ao ganho da antena usada: desprezando o ganho da antena em todos os pontos, e considerando o ganho da antena na direção de cada ponto analisado, em particular, com base na tabela de ganho em função do ângulo de elevação obtido. Os resultados e discussão a respeito são apresentados a seguir.

4.3 Resultados

Cada modelo de propagação estudado apresenta variações em relação à classificação do ambiente analisado. No caso da localidade em questão, as simulações de todos os modelos foram feitas considerando o ambiente envolvido com características suburbanas, visto que neste predominam construções residenciais baixas, não havendo edificações verticais altas (no máximo 2 pavimentos) [11]. Os resultados do estudo, para cada arquivo analisado, são apresentados a seguir. São mostrados os gráficos do nível de sinal recebido em ambiente *outdoor* (simulado e real) em função da distância entre o ponto de medição e a torre transmissora.

Na Fig. 4.6 são apresentados resultados pertinentes à simulação dos modelos estudados para as condições da rua Benedito Lima, assim como os dados relativos às medições realizadas. Na simulação dos modelos, o ganho da antena transmissora da ERB, na direção dos pontos analisados não foi considerado.

Na Fig. 4.7, conforme proposto na Fig. 4.5, o ganho da antena transmissora da ERB, na direção dos pontos analisados foi considerado na simulação dos modelos, para a rua Benedito Lima. Com isso, foram acrescentados aos dados obtidos na simulação da Fig. 4.6 os valores de ganho característico da antena transmissora da ERB, na direção de cada ponto analisado. Justifica-se desta forma o aspecto diferenciado assumido para as novas curvas obtidas, e, conseqüente aproximação destas com a curva que representa os dados da medição.

As Figs. 4.8, 4.9 e 4.10 mostram as simulações obtidas para as ruas Jesus Marques Prata, Tupis e Saudade, respectivamente. Nestas, assim como na Fig. 4.6, o ganho da antena transmissora da ERB foi considerado. As demais curvas, relativas à simulação dos modelos estudados nestas ruas, sem considerar o ganho da antena transmissora da ERB na direção do móvel, são apresentadas no apêndice 1, nas Figs. 7.1, 7.2 e 7.3.

As variações observadas nos níveis de sinal provenientes das medições se devem ao desvanecimento rápido (*fast fading*), fenômeno aleatório normalmente associado a ambientes de comunicação móvel. O efeito do desvanecimento rápido não é considerado pelos modelos estudados. Durante a execução dos testes, a ocorrência do desvanecimento rápido ficou evidenciada pela visualização, no notebook adaptado ao equipamento de coleta, de alterações abruptas no nível de sinal recebido da ERB, à medida que o veículo de deslocava pelo arruamento.

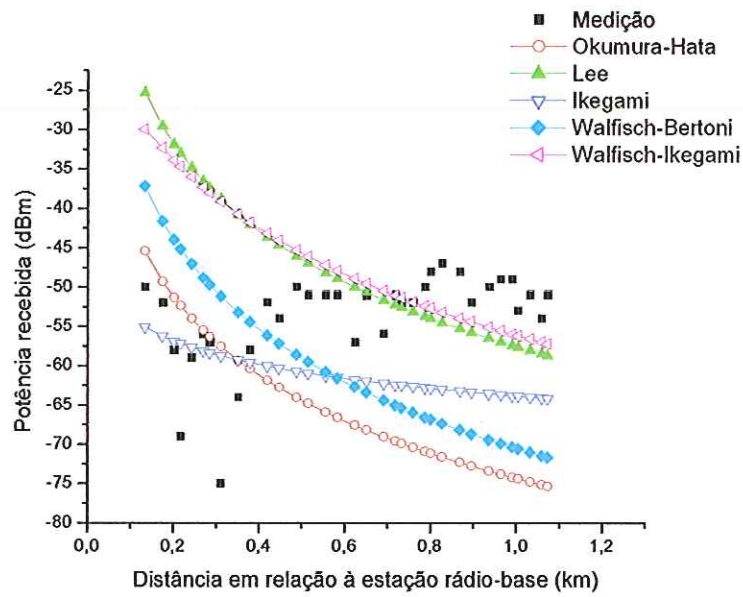


Figura 4.6. Nível de sinal recebido pelo móvel para a rua Benedito Lima, sem considerar o ganho da antena transmissora da ERB.

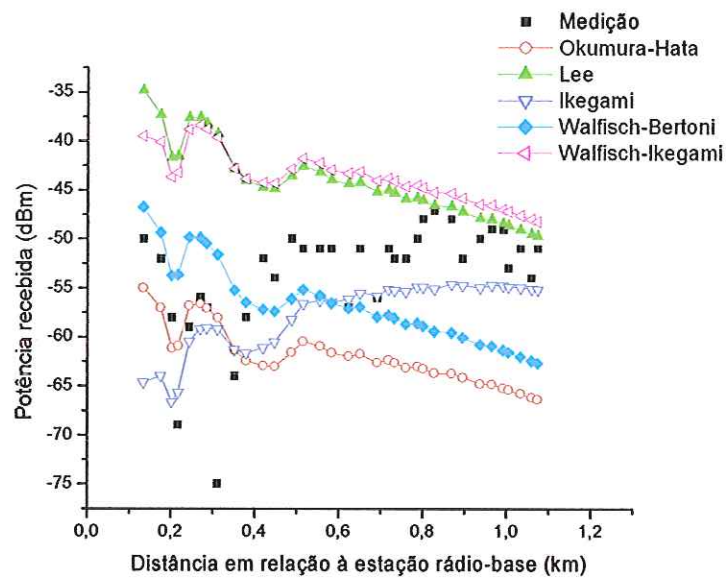


Figura 4.7. Nível de sinal recebido pelo móvel para a rua Benedito Lima, considerando o ganho da antena transmissora da ERB.

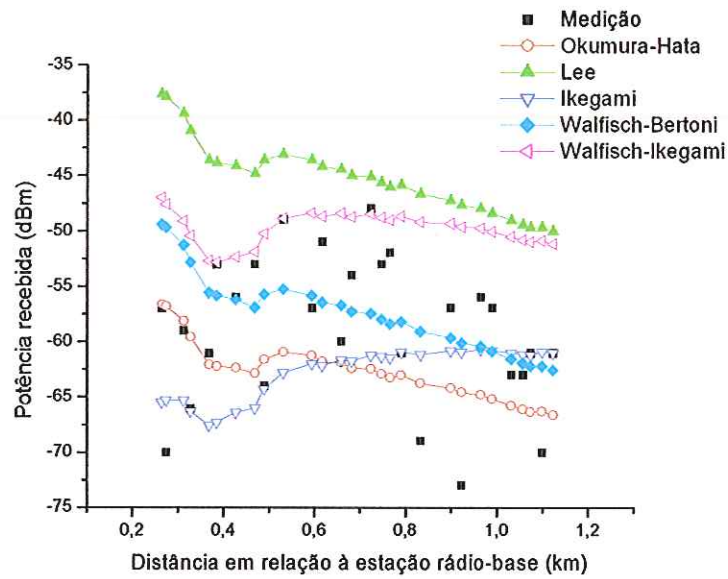


Figura 4.8. Nível de sinal recebido pelo móvel para a rua Jesus Marques Prata, considerando o ganho da antena transmissora da ERB.

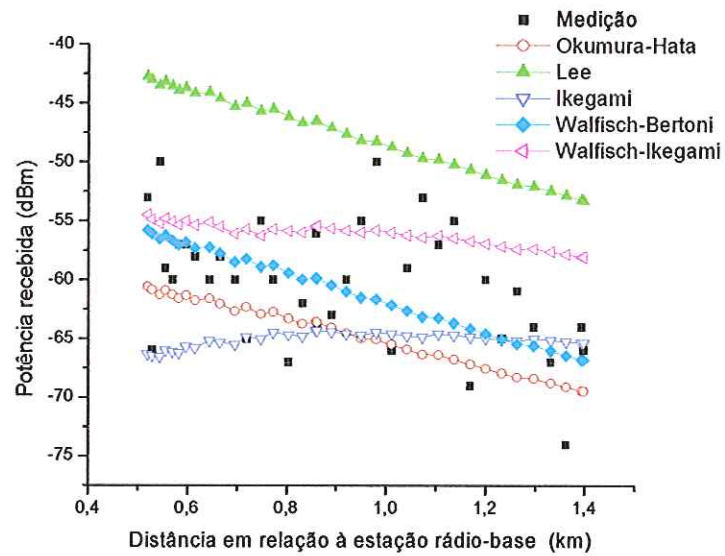


Figura 4.9. Nível de sinal recebido pelo móvel para a rua Tupis, considerando o ganho da antena transmissora da ERB.

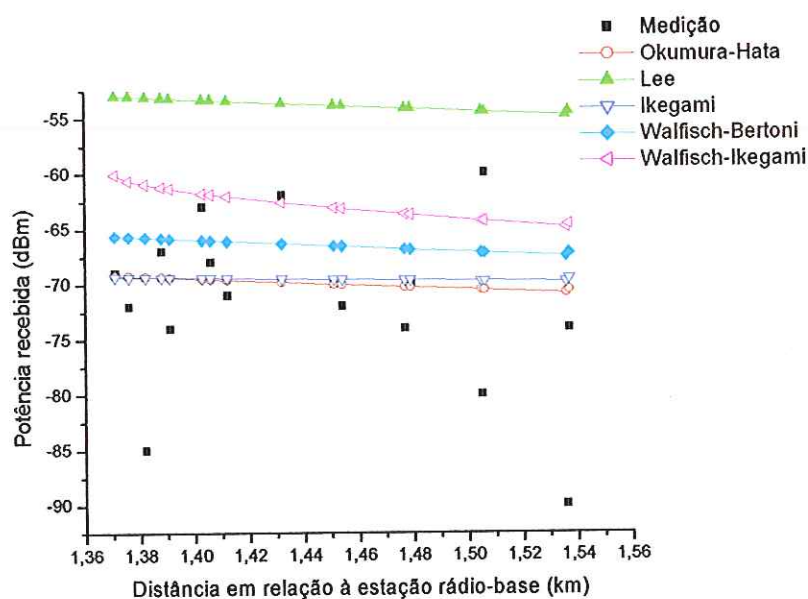


Figura 4.10. Nível de sinal recebido pelo móvel para a rua da Saudade, considerando o ganho da antena transmissora da ERB.

Com o objetivo de efetuar um estudo de desempenho mais criterioso de cada modelo, foram feitas, para cada rua, análises estatísticas sobre os dados obtidos, para avaliar os desvios existentes entre os valores simulados e medidos. Com isto, foi possível obter informações que permitiram escolher o modelo mais adequado para caracterizar o ambiente de propagação móvel da localidade estudada, além das informações gráficas fornecidas. Foram determinados: o desvio padrão médio percentual de cada ponto analisado em relação ao valor simulado; o desvio padrão percentual médio para cada modelo analisado; o desvio, em dB, para cada ponto, dos valores simulados e medidos em campo; e o desvio médio, em dB, para cada modelo estudado. As Tabelas 4.7 a 4.14 mostram os valores para as medidas feitas nas ruas Benedito Lima, Jesus Marques Prata, Tupis e Saudade, respectivamente.

Tabela 4.7. Desvio padrão médio percentual para as medidas feitas na rua Benedito Lima.

Okumura-Hata (Suburbano)	Lee (Suburbano)	Ikegami	Walfisch-Bertoni	Walfisch-Ikegami
14,61	21,24	8,38	12,55	21,76

Tabela 4.8. Desvio médio, em dB, para as medidas feitas na rua Benedito Lima.

Okumura-Hata (Suburbano)	Lee (Suburbano)	Ikegami	Walfisch-Bertoni	Walfisch-Ikegami
9,99	9,58	5,33	7,77	10,00

Tabela 4.9. Desvio padrão médio percentual para as medidas feitas na rua Jesus M. Prata.

Okumura-Hata (Suburbano)	Lee (Suburbano)	Ikegami	Walfisch- Bertoni	Walfisch- Ikegami
10,46	31,35	10,21	10,21	18,66

Tabela 4.10. Desvio médio, em dB, para as medidas feitas na rua Jesus M. Prata.

Okumura-Hata (Suburbano)	Lee (Suburbano)	Ikegami	Walfisch- Bertoni	Walfisch- Ikegami
6,55	13,87	6,45	5,69	9,26

Tabela 4.11. Desvio padrão médio percentual para as medidas feitas na rua Tupis.

Okumura-Hata (Suburbano)	Lee (Suburbano)	Ikegami	Walfisch- Bertoni	Walfisch- Ikegami
8,22	26,92	9,04	6,66	9,41

Tabela 4.12. Desvio médio, em dB, para as medidas feitas na rua Tupis.

Okumura-Hata (Suburbano)	Lee (Suburbano)	Ikegami	Walfisch- Bertoni	Walfisch- Ikegami
5,32	12,67	5,90	4,06	5,30

Tabela 4.13. Desvio padrão médio percentual para as medidas feitas na rua Saudade.

Okumura-Hata (Suburbano)	Lee (Suburbano)	Ikegami	Walfisch- Bertoni	Walfisch- Ikegami
7,67	33,58	8,00	10,65	15,60

Tabela 4.14. Desvio médio, em dB, para as medidas feitas na rua Saudade.

Okumura-Hata (Suburbano)	Lee (Suburbano)	Ikegami	Walfisch- Bertoni	Walfisch- Ikegami
5,38	18,06	5,57	7,09	9,77

Também foi feita uma análise global avaliando a média dos valores apresentados nas tabelas acima. A totalização obtida é mostrada nas Tabela 4.15 e Tabela 4.16, assim como nas Figs. 4.10 e 4.11.

Tabela 4.15. Análise global dos desvios padrão.

Rua	Okumura-Hata (suburbano)	Lee(suburbano)	Ikegami	Walfisch- Bertoni	Walfisch- Ikegami
Benedito Lima	14,61	21,24	8,38	12,55	21,76
Jesus M. Prata	10,46	31,35	10,21	10,21	18,66
Tupis	8,22	26,92	9,04	6,66	9,41
Saudade	7,67	33,58	8,00	10,65	15,60
Desvio médio global (%)	10,24	28,27	8,91	10,01	16,36

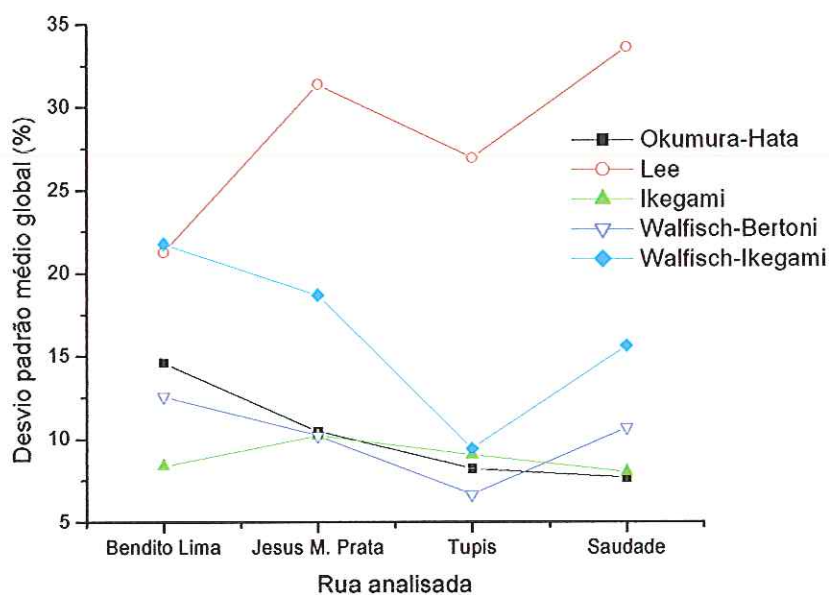


Figura 4.11. Comportamento do desvio padrão médio global percentual para as medidas feitas nas ruas.

Tabela 4.16. Análise global dos desvios, em dB.

Rua	Okumura-Hata (suburbano)	Lee (suburbano)	Ikegami	Walfisch- Bertoni	Walfisch- Ikegami
Benedito Lima	9,99	9,58	5,33	7,77	10,00
Jesus M. Prata	6,55	13,87	6,45	5,69	9,26
Tupis	5,32	12,67	5,90	4,06	5,30
Saudade	5,38	18,06	5,57	7,09	9,77
Desvio médio global (dB)	6,81	13,54	5,81	6,15	8,58

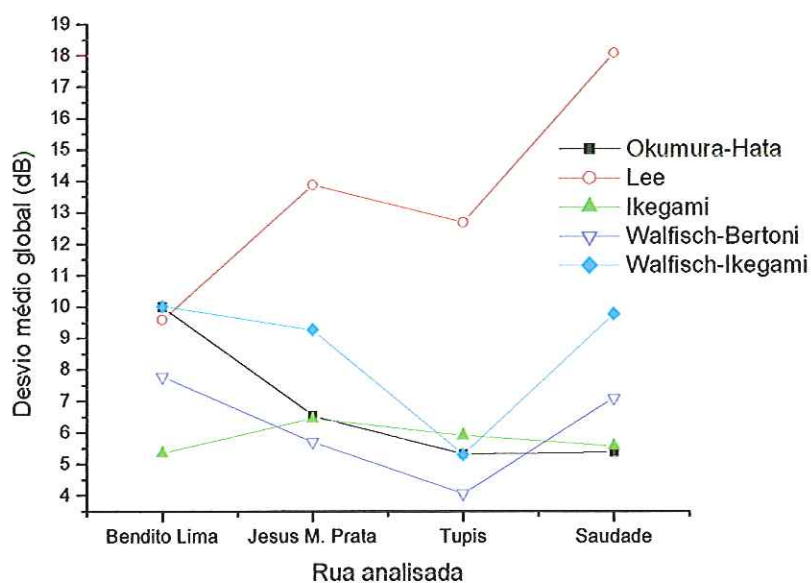


Figura 4.12. Comportamento gráfico do desvio global em dB.

Por meio dos resultados obtidos pode-se perceber que o modelo semi-empírico de Ikegami apresentou o melhor desempenho, em termos de proximidade com as medições de campo, sendo o desvio médio entre os valores simulados e medidos, inferior a 6 dB. Considerando que o desvio máximo aceitável para o nível de sinal recebido pelo móvel em relação à predição é de 8 dB [10], além do modelo de Ikegami, os modelos de Walfisch-Bertoni e de Okumura-Hata poderiam ser usados na predição de propagação da localidade analisada. Já os modelos de Walfisch-Ikegami e Lee deveriam passar por ajustes de seus coeficientes, caso se queira fazer um estudo de propagação nesta cidade por meio destes. Possivelmente, o ambiente urbano analisado para obtenção dos modelos citados não apresenta muitas similaridades com aquele encontrado na região estudada. Tal ajuste torna-se inviável neste trabalho, devido ao fato de que, para tal, seria necessário uma análise minuciosa de informações relativas à cobertura celular em toda a extensão urbana. Com isso, seria possível caracterizar o ambiente estudado com maior precisão. Neste trabalho, as informações relativas à cobertura celular foram obtidas por meio de amostras em apenas algumas vias públicas.

Ainda para comparar os resultados teóricos e medidos, foram feitas também interpolações polinomiais entre os valores de potência medidos. O objetivo foi analisar o desvio entre os níveis de potência recebidos pelo móvel e os valores de potência recebida descritos pelo modelo de melhor desempenho (Ikegami). Os resultados são mostrados nas Figs. 4.13-4.16, correspondendo aos dados relativos às ruas Benedito Lima, Jesus Marques Prata, Tupis e Saudade, respectivamente.

Desta forma, foi possível fazer uma comparação visual com o modelo de Ikegami, visto que as curvas relativas às informações de cobertura obtidas com o veículo de teste, nas ruas analisadas, mostram variações abruptas no nível de sinal recebido, evidenciando a presença de *fast fading* e, com isso, dificultando qualquer comparação gráfica.

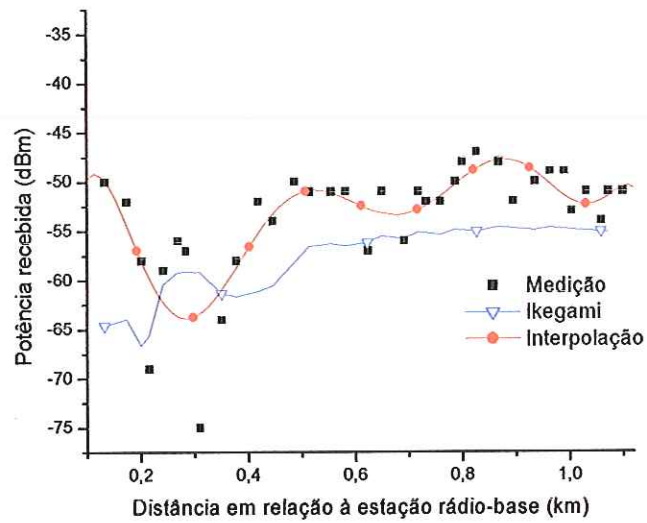


Figura 4.13. Interpolação dos valores de potência recebida, coletados na rua Benedito Lima e comparados com os valores de potência recebida previstos pelo modelo de Ikegami.

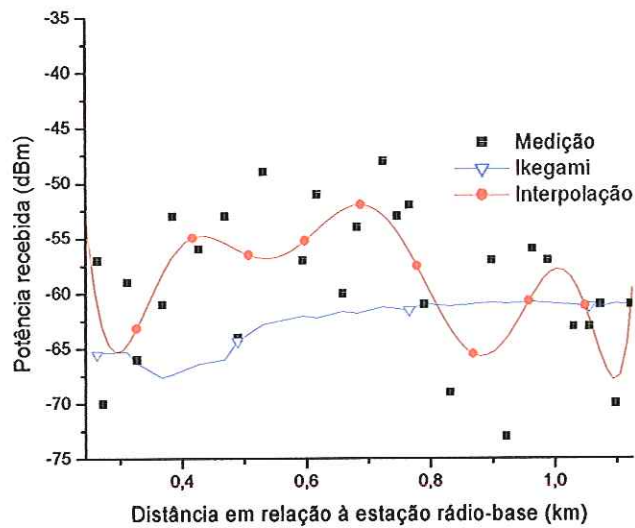


Figura 4.14. Interpolação dos valores de potência recebida, coletados na rua Jesus Marques Prata e comparados com os valores de potência recebida previstos pelo modelo de Ikegami.

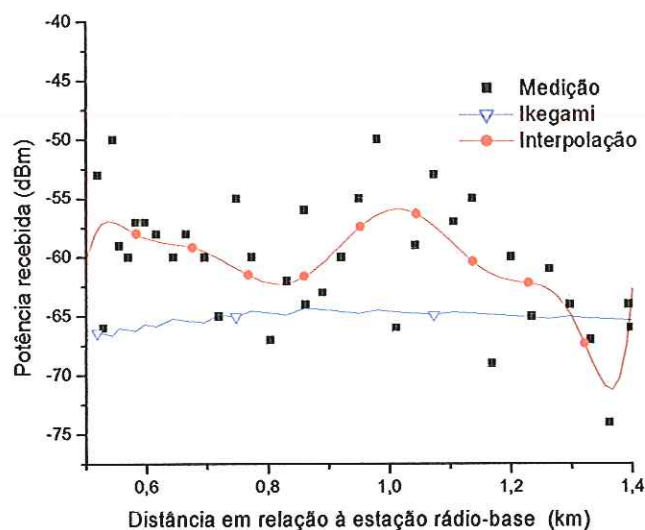


Figura 4.15. Interpolação dos valores de potência recebida, coletados na rua Tupis e comparados com os valores de potência recebida previstos pelo modelo de Ikegami.

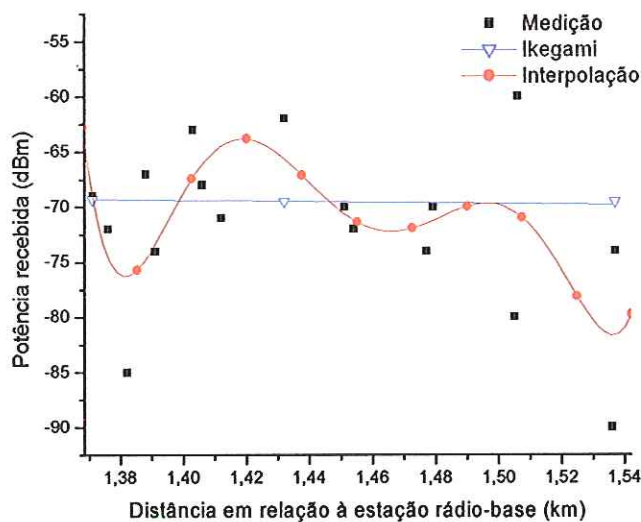


Figura 4.16. Interpolação dos valores de potência recebida, coletados na rua Saudade e comparados com os valores de potência recebida previstos pelo modelo de Ikegami.

Deve-se salientar também que uma maior precisão para o nível de sinal recebido pelo móvel poderia ser obtida nas simulações caso se dispusesse de um diagrama de irradiação mais detalhado da antena utilizada na ERB. Assim, eventuais interpolações poderiam ser evitadas para os ângulos de elevação fracionários obtidos, visto que o diagrama disponibilizado pelo fabricante apresenta incrementos de 1° , conforme mostrado anteriormente. O efeito do uso, nas simulações, do diagrama de irradiação apresentado pode ser visualizado no aspecto segmentado dos gráficos nos quais foi considerado o ganho da

antena. Nestes, foram adicionados aos valores obtidos nas simulações, sem qualquer ganho de antena, as características de ganho da antena, em alguns valores, conforme fornecido pelo fabricante. Para eliminar estes efeitos, um levantamento minucioso do diagrama de irradiação da antena usada se faz necessário.

Para o caso do levantamento de cobertura de portadoras em cidades onde existe reuso de frequências, deve-se bloquear todos os canais que apresentem a mesma frequência usada no teste de campo (nas células cocanais), além daqueles cujas frequências sejam adjacentes, na área urbana estudada. Desta forma, pode-se garantir que o espectro eletromagnético estaria imune a interferências do tipo cocanal e canal adjacente, aumentando a confiabilidade das medidas efetuadas pelo veículo de teste (ou seja, o nível de sinal coletado pelo veículo de teste seria devido somente a uma única ERB pré-definida). O problema gerado por este tipo de teste é a redução da capacidade de tráfego do sistema devido ao bloqueio de canais.

É preciso lembrar que os resultados apresentados foram obtidos para ambiente *outdoor*. Entretanto, observa-se uma redução média de 10 dB na cobertura *indoor*, devido a fontes irradiadoras *outdoor*. Com isso, as operadoras de serviço móvel celular podem inferir sobre o nível de sinal para situações de ambiente *indoor*, subtraindo-se 10 dB dos níveis de cobertura *outdoor*, em uma determinada região.

Capítulo 5

5.1 Conclusões

Este trabalho teve como objetivo estudar os principais modelos de propagação usados para predição de níveis de sinais em ambientes urbanos. O estudo comparativo entre os modelos empíricos de Lee e Okumura-Hata, assim como entre os modelos semi-empíricos de Walfisch-Bertoni, Ikegami e Walfisch-Ikegami, foi feito por meio de simulações, sendo os valores obtidos comparados com medidas de cobertura *outdoor*, obtidas por meio de um veículo de teste, na cidade de Conceição das Alagoas, MG. Com isso, foi possível verificar desvios entre eles, mostrando qual seria o modelo de propagação melhor adaptado às condições da região analisada. Esta, por sua vez, é essencialmente residencial, constituída de edificações baixas (máximo de 2 pavimentos), com grande regularidade no arruamento e baixa densidade de ocorrência, levando a classificá-la como suburbana. Neste estudo, foram usados os seguintes equipamentos: Veículo de teste dotado do equipamento de coleta RSAT 2000-IS 136, *Cell site test set* modelo 8921A fabricado pela Hewlett Packard (HP), GPS III versão Américas fabricado pela Garmin e equipamento de medição de VSWR/*return loss*, fabricado pela Anritsu. A estação rádio base (ERB) utilizada no teste é do fabricante Ericsson, modelo RBS 882, dotada de tecnologia analógica e digital. As medições foram efetuadas no período noturno e a portadora de teste usada foi o próprio canal de controle analógico da ERB local, de número 328. Por meio da análise do desvio padrão médio global e do desvio médio, foi possível classificar os modelos, de acordo com a Tabela 5.1.

Tabela 5.1. Avaliação dos modelos estudados, para o ambiente de Conceição das Alagoas.

Modelo	Desvio global (%)	Desvio global (dB)
Ikegami	8,91	5,81
Walfisch-Bertoni	10,01	6,15
Okumura-Hata	10,24	6,81
Walfisch-Ikegami	16,36	8,58
Lee	28,27	13,54

Por meio da Tabela 5.1, verifica-se que o modelo de Ikegami se mostrou mais propício à predição de nível de sinal na localidade analisada, apresentando o menor desvio dos valores simulados para a potência recebida pelo equipamento móvel, em relação às medições efetuadas.

Desta forma, como sugestão às empresas de pesquisa e desenvolvimento de ferramentas de predição de sinal, indica-se a inclusão do modelo de Ikegami ao elenco de modelos de propagação disponíveis nos softwares de predição. O objetivo é proporcionar às operadoras de telefonia celular e empresas especializadas em projetos maior precisão na análise de cobertura em cidades de pequeno porte, que apresentem características semelhantes ao ambiente analisado neste trabalho.

Deve-se dizer também que, com o inevitável aumento da demanda por serviços de comunicação móvel celular, as operadoras deverão aumentar a canalização disponível, por meio de novas ERB's e células, nas áreas urbanas. De forma a viabilizar maior incidência da reutilização de canais (frequências), espera-se uma redução na área de cobertura de cada célula. Com isso, áreas de serviço inicialmente constituídas por macrocélulas, nas condições descritas acima, tendem a configurações de microcélula e picocélula. Sendo assim, a predição de sinal neste novo cenário deverá ser obtida, preferencialmente, por modelos determinísticos, indicados ao estudo da propagação de ondas eletromagnéticas em ambientes com as características descritas, conforme visto neste trabalho.

Diante do acima exposto, um estudo mais detalhado sobre os modelos determinísticos de predição de sinal é sugerido para os próximos trabalhos.

Referências

- [1] Faruke, Saleh, *Cellular Mobile Systems Engineering*. Norwood: Artech House Inc., 1996
- [2] Iskander, Magdy F. e Yun, Zhengqing, "Propagation prediction models for wireless communication systems," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 50, pp. 662-673, março 2002.
- [3] Guimarães, Dayani Adionel, "Introdução às comunicações móveis," *Revista Telecomunicações – Inatel*, volume 1, no. 1, pp. 1-22, agosto 1998.
- [4] M. Diniz e J. Fernandes, "Provision of sufficient transmission capacity for broadband mobile multimedia: A new step toward 4G," *IEEE Communications Magazine*, vol. 39, pp. 46-54, agosto 2001.
- [5] Dixit, S., Guo, Y. e Antoniou, Z., "Resource management and quality of service in third – generation wireless networks," *IEEE Communications Magazine*, pp. 125-133, fevereiro 2001.
- [6] Ralph, D., Bonner, I., "3G and beyond – The applications generation," *IEE 3G Mobile Communications Technologies*, conference publication no 489, pp. 433-438, maio 2002.
- [7] Village, J.A., Worrall, K.P. e Crawford, D.I., "3G shared infrastructure," *IEE 3G Mobile Communications Technologies*, conference publication no 489, pp. 10-16, maio 2002.
- [8] Findlay, D., Flygare, H., Hancock, R., Haslestad, T., Hepworth, E., Higgins, D. e Mc Cann, S., "3G internetworking with wireless lans," *IEE 3G Mobile Communications Technologies*, conference publication no 489, pp. 394-399, maio 2002.
- [9] Ephremides, A., Ioth, T., Pickholtz, R., Iskander, M., Katehi, L., Rao, R., Stark W. e Winters, J., "Wireless technologies and information networks," *International Technology Research Institute – WTEC Division*, julho 2000.
- [10] W. Y. C. Lee, *Mobile Cellular Telecommunications Systems*. New York: McGraw-Hill, 1989.
- [11] Asha Mehrotra, *Cellular Radio Performance Engineering*. Norwood: Artech House Inc. 1994.

- [12] Cátedra, M. F. e Ariaga, J. P., *Cell Planning for Wireless Communications*. Norwood: Artech House Inc. 1999.
- [13] Walfisch, J. e Bertoni, H.L., "A teoretical model of UHF propagation in urban enviroment," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 36, pp. 1788-1796, dezembro 1988.
- [14] Ikegami, F., Yoshida S., Takeuchi, T. e Umehira, M., "Propagation factors controlling mean field strength on urban streets," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 32, pp.822-829, dezembro1984.
- [15] Celplan®, "Celplaner suite 5.3 – Programa Universidades," Campinas, dezembro 2002.
- [16] ERICSSON inc., *CMS 8800 Engenharia de RF1 – Teoria de Projeto e Dimensionamento*. Centro de treinamento técnico, São José dos Campos, 1998.
- [17] Guilhousen, K. S., Jacobs, Irwin M., Padovani, Roberto, Viterbi, Andrew J., Weaver, Lindsay A. Jr., Wheatley e Charles E, "On the capacity of a cellular CDMA system," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 40, no. 2, pp. 303-312, maio 1991.
- [18] Korhonen, Juha, *Introduction to 3G Mobile Communications*. Norwood: Artech House Inc. 2001.
- [19] Yang, N., "The third generation wireless network using CDMA interface," WCNC 1999 – *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, no. 1, pp. 649-653, setembro 1999.
- [20] Hayt Jr., William H., *Eletromagnetismo*. Rio de Janeiro: LTC, 1983.
- [21] Dolukhanov, M., *Propagation of Radio Waves*. Moscow: Mir Publishers, 1971.
- [22] <http://br.geocities.com/saladefisica>
- [23] SIEMENS Ltda., *Planejamento de Radioenlace Digital*. Centro de treinamento Werner Von Siemens, Curitiba, 1999.
- [24] Silva, G. V. F., Barradas, O. C. M., *Telecomunicações: Sistemas Radiovisibilidade*. Rio de Janeiro: LTC, 1978.
- [25] Barbiroli, M., Carciofi, C., Falciassecca, G., Frullone, M. e Grazioso, P., "A measurement – based methodology for the determination of validity domains of prediction models in urban environment," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 49, no. 5, pp. 1508-1514, setembro 2000.
- [26] Blaunstein, N., R., Giraldi e M. Levin, "Characteristics prediction in urban and suburban environments," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 47, no. 1, pp. 225-234, fevereiro 1998.

- [27] Ikegami, F. e Yoshida, S., "Analysis of multipath propagation structure in urban mobile radio environments," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*., vol. AP-28, pp.531-537, 1980.
- [28] Deygout, J. "Multiple knife-edge diffraction of microwaves," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. AP-14, pp. 480-489, 1966.
- [29] Vogler, L.E., "The attenuation of electromagnetic waves by multiple knife-edge diffraction," U.S. Dept. Commerce, NTIA rep. 81-86, 1981.
- [30] CTBC Celular S.A., "Módulo C – Sistema RBS 8800 ERB 882," Conceição das Alagoas, janeiro 2002.
- [31] Prefeitura municipal de Conceição das Alagoas – Secretaria de Esporte, Lazer e Turismo.
- [32] [http:// www.antel.com.br](http://www.antel.com.br)
- [33] [http:// www.celplan.com.br](http://www.celplan.com.br)
- [34] B. G. Evans e K. Baugham, "Visions of 4G," *Electron. Commun. Eng. J.* vol. 12, no. 6, pp. 293-330, dezembro 2000.
- [35] Lathi, B. P., *Sistemas de Comunicação*. Rio de Janeiro: Guanabara, 1987.
- [36] Proakis, J. G., *Digital Communications*, 3rd edition: McGraw Hill. New York, 1995.
- [37] Rappaport, T. S., *Wireless Communications – Principles and Practice: IEEE Press, Inc.*.New York and Prentice Hall, inc., New Jersey, 1996.
- [38] <http://www.etsi.org>
- [39] <http://www.umtsword.com>
- [40] <http://wnp.marconi.com/planet/index.shtml>
- [41] <http://www.testequipmentdepot.com/usedequipment/hewlettpackard/telcom/hp8921a.htm>
- [42] <http://www.lcc.com>
- [43] <http://www.garmin.com>
- [44] <http://www.anritsu.com>
- [45] <http://www.ericsson.com/services/tems/iden/deskcat-iden.shtml>
- [46] <http://www.microsoft.com>

- [47] <http://www.microcal.com>
- [48] <http://euler.on.br/~jlk/geopath/>
- [49] <http://www.icnirp.de/>
- [50] <http://www.who.int/peh-emf/en/>
- [51] Yacoub, M. D., Foundations of Mobile Radio Engineering, New York, CRC Press, 1993.

Apêndice

Apêndice 1 – Gráficos relativos à análise da potência recebida pelo móvel por meio dos modelos estudados, sem considerar o ganho da antena, para as ruas Jesus Marques Prata, Tupis e Saudade.

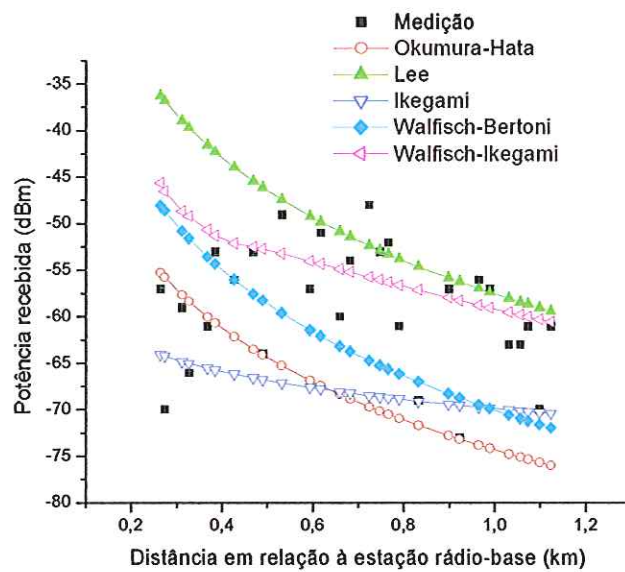


Figura 7.1. Nível de sinal recebido pelo móvel (simulação vs. medição) para a rua Jesus Marques Prata, sem considerar o ganho da antena transmissora da ERB.

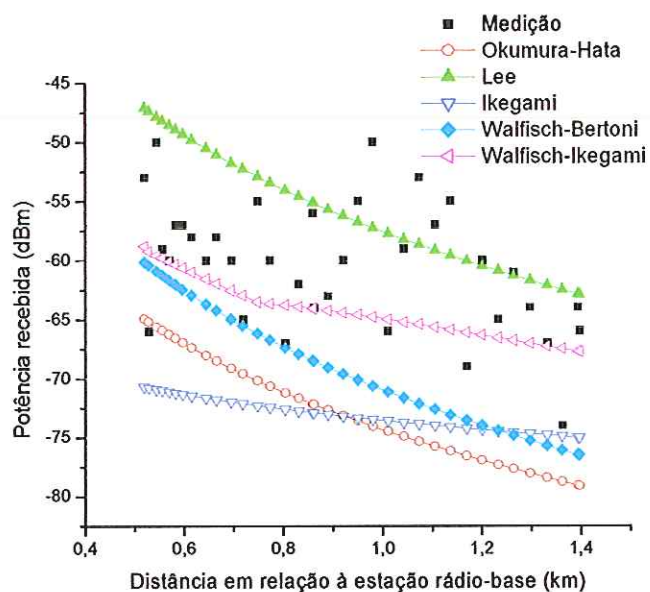


Figura 7.2. Nível de sinal recebido pelo móvel (simulação vs. medição) para a rua Tupis, sem considerar o ganho da antena transmissora da ERB.

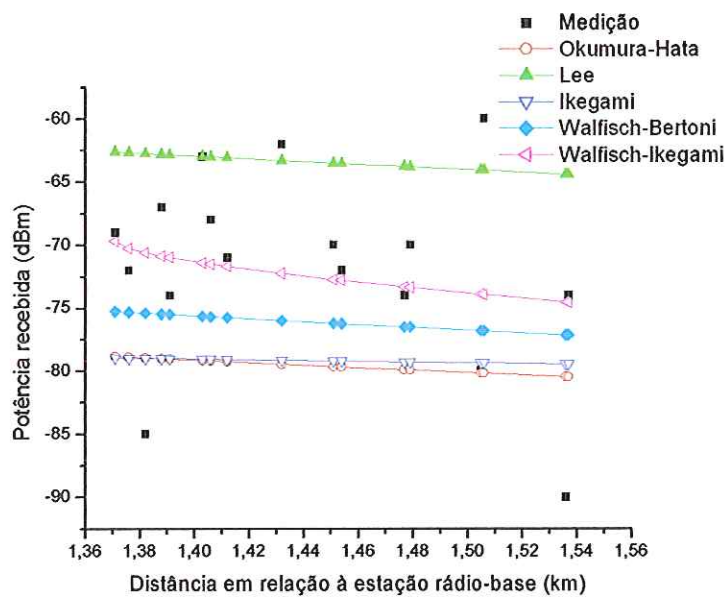


Figura 7.3. Nível de sinal recebido pelo móvel (simulação vs. medição) para a rua Saudade, sem considerar o ganho da antena transmissora da ERB.