

Handwritten notes in the top right corner.

Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica
Departamento de Comunicações

Handwritten mark on the left side.

*Uma Plataforma Flexível de Predição de Cobertura Celular com
Métodos Empíricos e Estatísticos Combinados*

Autor

César Kyn d'Ávila

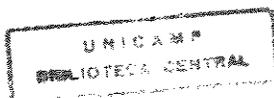
Orientador

Michel Daoud Yacoub

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica, Departamento de
Comunicações, como parte dos requisitos para a obtenção do
título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Campinas, 17 de Julho de 1995.

Handwritten signature and date: 17 de 07 de 95
Handwritten name: César Kyn d'Ávila
Text: Este exemplar...
Text: defendido...



Agradecimentos

O momento dos agradecimentos em uma tese é gratificante. Nesse instante, o trabalho já foi concluído e cabe apenas homenagear as pessoas que contribuíram com esse desenvolvimento.

De forma inquestionável, o primeiro e principal agradecimento é ao meu orientador, Michel Yacoub, sem o qual esse trabalho dificilmente seria efetivado. Nos momentos de dificuldade, a disponibilidade para ajuda esteve sempre presente e além das expectativas. No decorrer do desenvolvimento dessa tese me disciplinei para retribuí-lo com trabalho para que se concretizasse uma troca, e apesar disso me sinto ainda em débito pelo tanto que adquiri em conhecimento.

Devo agradecer também de forma especial à CAPES pelo suporte financeiro e à *CelTec* Tecnologia de Telecomunicações pela oportunidade oferecida que sem dúvidas foi muito importante para essa realização.

Os agradecimentos devem ser estendidos ainda aos meus amigos Marcelo Konemba, Pedro Fei Chau, Pedro Gapski e Ricardo Navas pelas contribuições dadas ao trabalho.

Por final, agradeço aos meus pais, Saul e Tiyoka, ao meu irmão Marcos, e à Adelize pelo apoio sempre veemente às minhas idéias.

Resumo

O objetivo principal alcançado por esse trabalho foi o desenvolvimento de uma plataforma flexível de predição de cobertura celular com métodos empíricos e estatísticos combinados. A referida flexibilidade da plataforma está relacionada à possibilidade de se combinar diversos modelos e métodos propostos na literatura, possibilitando inclusive a obtenção de métodos não usuais, que unificam as características de diferentes modelos. As etapas necessárias para esse desenvolvimento foram desde o estudo das metodologias empíricas e estatísticas de predição de cobertura, até a especificação e implementação da plataforma propriamente dita.

Durante o processo foram ainda efetuadas uma série de contribuições como a proposição do método da estatística local, a proposição do método combinado ponto a ponto, desenvolvimento do modelo de reflexão de Okumura, além de análises e conclusões sobre as diversas metodologias estudadas.

Não existem contradições. Sempre que você achar que está vendo uma contradição, verifique suas premissas. Você vai descobrir que uma delas está errada.

Ayn Rand em *Quem é John Galt ?*

Aos meus pais Saul e Tiyoka.

Conteúdo

Prefácio	xii
1 Introdução	1
1.1 Sistema Rádio Móvel Celular	1
1.2 Planejamento de um Sistema Rádio Móvel Celular	2
1.3 Histórico dos Modelos de Predição de Cobertura	3
1.4 Proposta do Trabalho	5
2 Métodos Empíricos	7
2.1 Modelos Teóricos Básicos	8
2.1.1 Propagação no Espaço Livre	9
2.1.2 Modelo do Terreno Plano	9
2.1.3 Modelo de Difração para uma Obstrução	10
2.2 Métodos de Propagação	12
2.2.1 Método de Okumura	12
2.2.2 Formulação de Hata	16
2.2.3 Modificação de Akeyama	18
2.2.4 Método de Lee	19
2.2.5 Método de Ibrahim-Parsons	21
2.3 Modelos de Difração	23
2.3.1 Modelo de Bullington	24
2.3.2 Modelo de Deygout	24
2.3.3 Modelo de Giovaneli	25
2.4 Modelos de Reflexão	27
2.4.1 Altura Efetiva de Okumura	27
2.4.2 Altura Efetiva de Lee	29
2.5 Sumário	30

3	Métodos Estatísticos	31
3.1	Ambientes de Propagação	32
3.1.1	Ambiente Lognormal	32
3.1.2	Ambiente Rayleigh	33
3.1.3	Ambiente Suzuki	34
3.1.4	Ambiente Rice	34
3.1.5	Ambiente Nakagami	35
3.1.6	Ambiente Nakagami Sombreado	36
3.2	Cálculo da Área de Cobertura	38
3.2.1	Método da Proporção do Perímetro	38
3.2.2	Método da Proporção da Área	39
3.2.3	Método da Estatística Local	39
3.3	Sumário	42
4	Método Combinado	43
4.1	Descrição Geral	45
4.2	Cálculo da Média Local	45
4.3	Modelo para o Desvanecimento de Longo Prazo e Curto Prazo .	46
4.4	Sumário	47
5	Implementação da Plataforma de Predição de Cobertura	48
5.1	Estrutura Geral	49
5.2	Interface com o Usuário	50
5.3	Núcleo de Predição de Cobertura (NPC)	53
5.3.1	Algoritmos dos Modelos de Propagação	55
5.3.2	Algoritmos dos Modelos de Difração	57
5.3.3	Algoritmos dos Modelos de Reflexão	66
5.3.4	Algoritmo do Método Estatístico	66
5.4	Sumário	68
6	Simulações e Resultados	71
6.1	Avaliação da Implementação	71
6.1.1	Avaliação dos Modelos de Propagação	72
6.1.2	Avaliação dos Modelos de Difração	81
6.1.3	Avaliação dos Modelos de Reflexão	85
6.1.4	Avaliação do Método Estatístico	87
6.2	Estudo Comparativo	88
6.2.1	Estudo Comparativo dos Métodos Empíricos	88

6.2.2	Estudo Comparativo do Método Combinado	96
6.3	Sumário	102
7	Considerações Finais	104
7.1	Contribuições da Tese	105
7.2	Proposição para Trabalhos Futuros	105
A	Limitação dos Métodos Empíricos	107
A.1	Propagação por Múltiplas Morfologias	107
A.2	A Limitação da Formulação de Hata	110
A.3	A Limitação do Método de Ibrahim-Parsons	110
A.4	A Limitação do Método de Lee	111
A.5	Sumário	112
B	Distribuição Nakagami Sombreado	113
B.1	Nakagami a partir de Nakagami Sombreado	115
B.2	Rayleigh a partir de Nakagami Sombreado	115
B.3	Rice a partir de Nakagami Sombreado	116
B.4	Suzuki a partir de Nakagami Sombreado	116
B.5	Rice Sombreado a partir de Nakagami Sombreado	117
B.6	Lognormal a partir de Nakagami Sombreado	117
B.7	Sumário	117

Lista de Tabelas

2.1	<i>Formulação de Hata - Fator de correção $a(h_r)$.</i>	16
6.1	<i>Ambientes de Propagação - Dados para as Simulações.</i>	73
6.2	<i>Condições de Operação do Sistema para Simulações.</i>	75
6.3	<i>Resultados das Simulações com o Método Combinado.</i>	98
A.1	<i>Dados das Retas de Perdas do Sinal em cada Morfologia.</i>	109
A.2	<i>Perdas na Propagação e Raio de Cobertura.</i>	109
B.1	<i>Flexibilidade da Distribuição Nakagami Sombreado.</i>	118

Lista de Figuras

2.1	<i>Propagação de um sinal em um terreno plano.</i>	10
2.2	<i>Difração devido a uma obstrução.</i>	10
2.3	<i>Situação de ganho devido a uma obstrução.</i>	11
2.4	<i>Atenuação média do sinal em uma região urbana, em relação ao espaço livre.</i>	14
2.5	<i>Curvas para a predição do ganho da antena na transmissão em relação a uma antena de 200m, em função da distância.</i>	14
2.6	<i>Curvas de predição do ganho da antena veicular.</i>	15
2.7	<i>Perdas por propagação em uma dada morfologia.</i>	20
2.8	<i>Propagação por quatro morfologias diferentes.</i>	22
2.9	<i>Modelo de Bullington</i>	24
2.10	<i>Modelo de Deygout</i>	25
2.11	<i>Modelo de Giovaneli.</i>	26
2.12	<i>Altura Efetiva da Antena Transmissora (h'_t)</i>	27
2.13	<i>Altura Efetiva da Antena Transmissora de Okumura (h'_t)</i>	28
2.14	<i>Fator de correção para terrenos inclinados (K_{sp}).</i>	28
2.15	<i>Altura Efetiva da Antena Transmissora de Lee (h_i)</i>	29
4.1	<i>Decomposição do Sinal de Desvanecimento.</i>	44
4.2	<i>Fluxograma Geral do Método Combinado.</i>	45
5.1	<i>Estrutura Geral do Software de Predição de cobertura.</i>	49
5.2	<i>Módulo de Propagação por um Perfil Topográfico.</i>	51
5.3	<i>Módulo de Cobertura Celular.</i>	52
5.4	<i>Hierarquia de classes no NPC.</i>	54
5.5	<i>Algoritmo Básico das Metodologias Empíricas.</i>	55
5.6	<i>Núcleo de Predição de Cobertura (NPC).</i>	56
5.7	<i>Fluxograma - Formulação de Hata.</i>	58
5.8	<i>Fluxograma - Modificação de Akeyama.</i>	59

5.9	<i>Fluxograma - Modelo de Lee (Propagação).</i>	60
5.10	<i>Fluxograma - Modelo de Ibrahim-Parsons.</i>	61
5.11	<i>Fluxograma - Perdas por Difração de uma Obstrução.</i>	62
5.12	<i>Fluxograma - Modelo de Bullington.</i>	63
5.13	<i>Fluxograma - Modelo de Deygout.</i>	64
5.14	<i>Fluxograma - Modelo de Giovaneli.</i>	65
5.15	<i>Fluxograma - Modelo de Okumura (Reflexão).</i>	67
5.16	<i>Fluxograma - Modelo de Lee (Reflexão).</i>	68
5.17	<i>Fluxograma - Método da Estatística Local.</i>	69
6.1	<i>Simulação com os Modelos Empíricos de Propagação em uma Área Aberta.</i>	74
6.2	<i>Simulação com os Modelos Empíricos de Propagação (Área Suburbana).</i>	76
6.3	<i>Simulação com os Modelos Empíricos de Propagação (Área Urbana).</i>	77
6.4	<i>Simulação com os Modelos Empíricos de Propagação (Área Urbana Densa).</i>	78
6.5	<i>Simulação com os Modelos Empíricos de Propagação (Múltiplas Morfologias).</i>	80
6.6	<i>Simulação com os Modelos de Difração - Perfil Topográfico com 1 obstrução.</i>	82
6.7	<i>Simulação com os Modelos de Difração - Perfil Topográfico com 4 obstruções.</i>	83
6.8	<i>Simulação com os Modelos de Difração - Perfil Topográfico com 15 obstruções.</i>	84
6.9	<i>Simulação com os Modelos de Reflexão - Perfil Topográfico Especial.</i>	86
6.10	<i>Avaliação da Implementação do Método da Estatística Local - Distribuição Nakagami Sombreado com variações de m.</i>	89
6.11	<i>Avaliação da Implementação do Método da Estatística Local - Distribuição Nakagami Sombreado com variações de σ.</i>	90
6.12	<i>Avaliação da Implementação do Método da Estatística Local - Fator ξ para Alguns Ambientes Nakagami Sombreado.</i>	91
6.13	<i>Estudo Comparativo entre Metodologias Empíricas - Perfil bem Comportado.</i>	94
6.14	<i>Estudo Comparativo entre Metodologias Empíricas - Perfil obstruído.</i>	95

6.15	<i>Estudo Comparativo entre Metodologias Empíricas - Perfil com um Platô.</i>	97
6.16	<i>Estudo Comparativo do Método Combinado - Variações de ξ para $m = 2$ e $\sigma = 1$ dB.</i>	99
6.17	<i>Estudo Comparativo do Método Combinado - Variações de ξ para $m = 6$ e $\sigma = 1$ dB.</i>	100
6.18	<i>Estudo Comparativo do Método Combinado - Variações de ξ para $m = 4$ e $\sigma = 10$ dB.</i>	101
A.1	<i>Propagação por Múltiplas Morfologias.</i>	108
A.2	<i>Perfil Morfológico Exemplo.</i>	108

Prefácio

Com o objetivo de alertar o leitor de algumas das características desse trabalho, esse prefácio foi desenvolvido. A estrutura com que foi montada essa tese faz com que alguns dos seus capítulos sejam módulos isolados. Os Capítulos 2, 3 e 4 são praticamente independentes, podendo ser lidos em qualquer ordem. Entretanto, a dependência de informações é grande durante a leitura dos Capítulos 5, 6 e 7, ou seja, é esperado, para o completo entendimento, o conhecimento do conteúdo dos capítulos anteriores.

Outro aspecto interessante de citar de antemão são as contribuições desse trabalho, para que a leitura seja feita de uma forma mais direta. Dessa forma tem-se :

- No Capítulo 2, a definição do modelo de reflexão de Okumura.
- No Capítulo 3, a proposição do método da estatística local.
- No Capítulo 4, a proposição do método combinado com o uso de metodologias empíricas ponto a ponto e o método da estatística local.
- No Capítulo 5, a implementação da plataforma flexível de predição de cobertura celular, principal objetivo da tese.
- No Capítulo 6, simulações e análises com os métodos e modelos de predição de cobertura.

- No Apêndice A, o estudo das limitações dos métodos empíricos de propagação.
- No Apêndice B, o estudo de algumas das características da distribuição Nakagami Sombreado.

Portanto, a partir do conhecimento das informações desse prefácio, a leitura poderá ser feita de uma forma mais objetiva, tornando-a, com certeza, mais agradável.

Capítulo 1

Introdução

No final do século 19, H. G. Hertz, demonstrou que ondas de rádio podiam se propagar pelo ar [1]. Imediatamente percebeu-se a grande potencialidade de uma forma de comunicação que dispensasse fios, sendo que a primeira aplicação prática implementada foi a comunicação marítima. A partir desse primeiro sistema de comunicação móvel até hoje, a grande evolução tecnológica, principalmente no nosso século, possibilitou a construção de sistemas complexos, como o Sistema de Telefonia Móvel Celular, que envolvem milhões de pessoas no mundo inteiro.

Nessa evolução dos sistemas rádio móveis, pesados investimentos foram feitos em diferentes países em épocas distintas. Os motivos que levaram a comunidade mundial a esses grandes investimentos advém puramente da questão da sempre crescente demanda do mercado por serviços mais sofisticados e eficientes. A eficiência na obtenção de informação, com certeza a maior fonte de riqueza atualmente, é uma questão crucial e estratégica, e dentro desse quadro, os sistemas de comunicação móvel certamente se tornaram uma importante ferramenta.

1.1 Sistema Rádio Móvel Celular

Os primeiros sistemas rádio móveis comerciais apresentavam como característica, transmissores de alta potência, e conseqüentemente grandes áreas de cobertura (30 a 50 quilômetros de raio), além de limitações na portabilidade dos aparelhos móveis e na disponibilidade de canais de comunicação. Essas características tornaram esses sistemas limitados em capacidade ou ainda pelo

estreito segmento de mercado atingido pelo alto preço final da unidade móvel.

A evolução tecnológica, principalmente no gerenciamento de sistemas, além das novas tecnologias na área de comutação, permitiram a difusão da concepção dos chamados sistemas celulares. Esses sistemas são planejados em função de antenas transmissoras de baixa potência, pequenas áreas de cobertura (células com raios da ordem de 10 quilômetros), para unidades móveis de pequeno porte. Essa concepção sistêmica, que se baseia na prática de reuso de frequências, aumentou enormemente a capacidade de tráfego, além de atingir uma faixa mais ampla no mercado, em decorrência dos preços menores das unidades móveis. Outro aspecto dos sistemas celulares que contribui com o aumento da capacidade do sistema, é a possibilidade do uso de frequências mais altas e, portanto, um maior número de canais por segmento de espectro.

Dessa forma, principalmente na última década, o mundo tem visto um grande crescimento na capacidade dos sistemas rádio móveis. Entretanto, a demanda por esse tipo de serviço continua crescendo de forma mais rápida [2].

Portanto, apesar dos grandes avanços já alcançados, a evolução dos sistemas rádio móveis é contínua existindo uma clara tendência na concepção de sistemas que utilizem frequências mais altas [3], potências menores e assim células menores (500 metros a 2 quilômetros de raio). Sistemas com essas características são chamados de sistemas de microcélulas, sendo recentemente aplicados em regiões densamente urbanizadas, onde existe uma alta demanda pelos serviços de rádio de natureza móvel.

1.2 Planejamento de um Sistema Rádio Móvel Celular

Uma das fases mais importantes dentro da concepção de um projeto rádio móvel celular ou microcelular é, justamente, a fase de planejamento. Nessa etapa são estudados os problemas de dimensionamento do sistema visando uma otimização dos custos e prevenção de determinados erros. Uma boa concepção na fase de planejamento certamente diminui significativamente os custos de implantação, operação e manutenção do sistema.

Portanto, devido à grande importância dessa etapa do projeto, é de grande ajuda a disponibilidade de ferramentas que agilizem os cálculos e facilitem a manipulação e visualização dos resultados.

Dessa forma, uma ferramenta que se torna imprescindível para o planeja-

mento celular é um *software* de predição de cobertura. Essa ferramenta tem a função de calcular, através de metodologias propostas na literatura, a área de cobertura de uma dada estação rádio base. Com isso, é possível determinar regiões críticas, onde não existe cobertura pelo sistema ou ainda áreas de sobreposição entre células para posteriores avaliações do problema de interferência. De acordo com os resultados dessas estimativas é possível alterar posição, ganho e potência das estações rádio base, ou seja, efetuar uma calibração prévia no sistema. Esse tipo de prática reduz significativamente os custos de um projeto, ficando clara a importância da etapa de planejamento e de uma plataforma de predição de cobertura no projeto de um sistema rádio móvel.

Um aspecto relevante desses *softwares* de predição é o fato de necessariamente agregarem em sua estrutura modelos que descrevem os efeitos sofridos por um sinal se propagando, ou seja, esses modelos se constituem na base teórica das plataformas de predição de cobertura.

Portanto, tanto no processo de implementação quanto no de operação desse tipo de *software*, é imprescindível o conhecimento sobre as características básicas dos métodos e modelos para a predição de cobertura.

1.3 Histórico dos Modelos de Predição de Cobertura

Devido à grande importância dada às comunicações rádio móveis, um grande número de trabalhos sobre a propagação de ondas e sobre modelos para predição de cobertura foram desenvolvidos. De uma forma geral, esses estudos seguem historicamente duas linhas básicas de desenvolvimento :

- Modelamentos Empíricos
- Modelamentos Estatísticos

A seguir são mencionados alguns marcos históricos de cada uma das duas linhas de desenvolvimento citadas.

Alguns Marcos Históricos dos Modelos Empíricos

Na linha de estudos dos modelos empíricos, os primeiros trabalhos importantes visavam a descrição da propagação sobre terrenos irregulares. Os modelos propostos por Bullington [4], Epstein-Peterson [5] e Egli [6] datam dos anos 40 e 50.

Esses primeiros modelos eram bastante simples, sendo que evoluções importantes foram propostas na década de 60. Trabalhos como os de Millington [7], Furutsu [8] e Deygout [9] resultaram em significativas contribuições. Entretanto, em 1968, Okumura *et al.* [10] propuseram um método para a predição da propagação de ondas de rádio que serviu de base para a maioria dos trabalhos posteriores na linha empírica. A evolução desses modelos continuou no final dos anos 60 e nos anos 70 com diversos trabalhos como os de Allsebrook [11], Graziano [12], Blomquist-Ladell [13] e Longley-Rice [14].

Um novo impulso foi dado no desenvolvimento dos modelos empíricos nos anos 80. Nessa década, o advento da difusão dos sistemas de computação impulsionou as pesquisas em direção a modelos mais complexos, e algoritmos computacionalmente mais eficientes. Em 1980, Hata [15] desenvolveu uma formulação que descreve com grande precisão boa parte dos resultados obtidos por Okumura *et al.* [10], facilitando a implementação computacional desse modelo. Outros trabalhos como os de Akeyama [16], Giovaneli [17], Lee [18] e Ibrahim-Parsons [19] são extremamente difundidos até hoje. Dentre esses trabalhos, o proposto por Lee resultou em um grande avanço com a introdução do conceito de predição ponto a ponto.

Já no final dos anos 80 e início dos anos 90, com as idéias sobre sistemas de microcélulas, os trabalhos são direcionados para a predição da propagação de sinais em frequências maiores com o uso de antenas de baixa potência. Entretanto, os modelos de predição para microcélulas já desenvolvidos necessitam invariavelmente de uma grande quantidade de informações contidas em bases de dados. Os modelos considerados mais eficientes para a predição de microcélulas são os propostos por Walfisch [20], Ikegami [21], além das técnicas de *Ray-Tracing* [22, 23]. Entretanto, existem trabalhos como o do grupo Euro-COST231 [24], que procuram adaptar os modelos mais tradicionais como a formulação de Hata [15] para o caso de microcélulas. Esse tipo de prática tem se difundido com intensidade pois apresenta resultados satisfatórios sem o aumento da complexidade das bases de dados já existentes.

Dessa forma, como citado anteriormente, o maior problema desses modelos para microcélulas é a necessidade de uma base de dados muito precisa. Essas bases de dados são muito caras, existindo uma grande dificuldade para obtê-las, impondo-se dessa forma, restrições para a difusão desses modelamentos específicos para microcélulas.

Alguns Marcos Históricos dos Modelos Estatísticos

Os estudos dos modelamentos estatísticos inciam-se com intensidade na década de 60. Com o intuito de descrever os efeitos sofridos por um sinal na recepção, Nakagami [25] e Clarke [26] desenvolveram trabalhos que modelam características desses sinais com o uso de distribuições estatísticas. As aplicações com o uso desses modelos são ainda muito utilizadas por permitirem uma avaliação rápida das características do sinal na recepção.

Já nas décadas de 70 e 80, a maioria dos desenvolvimentos foram direcionados para a confirmação dos modelos já desenvolvidos [27], ou na busca de novas distribuições estatísticas que descrevessem de forma mais eficiente os ambientes de propagação. Por exemplo, os trabalhos de Suzuki [28] e Hansen [29] uniram em uma única distribuição de probabilidades dois efeitos sofridos pelo sinal : sombreamento e multipercurso.

Na década de 90 os estudos continuaram nessa mesma direção. Procura-se constantemente modelar os fenômenos de propagação através de novas distribuições de probabilidades. Dessa forma, nessa linha, em 1990, Marsan e Hess [30] mostraram a possibilidade de modelar o efeito de sombreamento de um sinal em pequenas localidades, através de uma distribuição Lognormal. Em 1994, o trabalho desenvolvido por Guedes [31] mostra a grande flexibilidade da distribuição de Nakagami e de sua extensão, Nakagami Sombreado, sendo que essa última modela os efeitos de sombreamento e multipercurso superpostos.

Método Combinado

A idéia do desenvolvimento de um método combinado que integre as metodologias empíricas com as estatísticas tem o intuito de modelar as características do sinal na localidade da recepção de forma mais completa, sendo esse um dos objetivos desse trabalho de tese. Com o uso das metodologias ponto a ponto empíricas [18] e do método da estatística local (Seção 3.2.3, Capítulo 3), essa união se torna possível. Maiores detalhes acerca do método da estatística local e do método combinado (Capítulo 4) serão abordados no decorrer dessa tese.

1.4 Proposta do Trabalho

A principal proposição desse trabalho é a implementação de uma plataforma de predição de cobertura que implemente o método combinado. A partir desse

objetivo principal, outros trabalhos foram desenvolvidos.

Uma consequência óbvia para a implementação desse *software* foi a necessidade do estudo das principais metodologias para a predição de cobertura.

Dessa forma, o Capítulo 2 desse trabalho aborda justamente os estudos relativos aos métodos empíricos de predição. Nesse capítulo, procurou-se organizar, de uma forma sistemática e coerente, as informações contidas na literatura através da categorização dos modelos empíricos. No Capítulo 3, são apresentados estudos dos métodos e modelos estatísticos. Em especial, nesse capítulo é feita a proposição do método da estatística local (Seção 3.2.3). No Capítulo 4 é feita a descrição do método combinado que agrega métodos empíricos ponto a ponto e o método da estatística local em um único algoritmo.

A implementação da plataforma propriamente dita é feita no Capítulo 5, no qual são apresentados os diversos fluxogramas para a implementação dos métodos e modelos de predição, além de uma descrição das características gerais da plataforma de predição desenvolvida.

Já o Capítulo 6 é dedicado às simulações com o *software* implementado, sendo que a partir desses resultados é feita a validação da implementação, além de análises comparativas entre os métodos e modelos.

Esse documento finaliza com um capítulo de considerações finais. No Capítulo 7 são ainda abordados os aspectos de possíveis trabalhos futuros para a continuidade do trabalho desta tese.

Capítulo 2

Métodos Empíricos

A propagação de ondas de rádio no ambiente móvel constitui um fenômeno onde uma análise exata pode ser aplicada em algumas poucas e simplificadas situações. Um modelo matemático que descreva com precisão os efeitos sofridos por um sinal se propagando é certamente muito complexo quando em situações práticas. Mesmo com aproximações que simplifiquem o problema original, a complexidade, embora diminuída, pode continuar considerável. Dessa dificuldade vem a principal motivação para o estudo desse tipo de problema através de métodos empíricos.

Os métodos empíricos apresentam, como grande mérito, as vantagens na sua aplicabilidade. Normalmente, esse tipo de modelamento possui uma estrutura bastante simples facilitando a implementação computacional. Certamente essa simplicidade é contrabalançada com imprecisões nos resultados e, apesar dos desvios inerentes da própria metodologia empírica, os erros são aceitáveis para os propósitos de um projeto e planejamento de um sistema rádio móvel.

Antes de qualquer outra descrição das características dos métodos empíricos, é importante nesse ponto definir as diferenças existentes entre um método e um modelo. Um método consiste em um procedimento ou programa que regula previamente uma série de operações que devem ser realizadas em vista de um resultado determinado. Já um modelo é um conjunto de hipóteses sobre a estrutura ou comportamento de um sistema físico, pelo qual se procura explicar ou prever, dentro de uma teoria científica, as propriedades do sistema. Portanto, pode-se concluir, com base nessas definições, que um método pode se utilizar de diversos modelos para implementar um determinado algoritmo ou procedimento. Uma das conseqüências desse conceito de método é o fato de estes herdarem características dos modelos. Por exemplo, na realidade, o

fato de um método ser empírico é uma consequência da utilização de modelos empíricos.

Verificando as características dos diversos métodos propostos na literatura [10, 16, 18, 19] para o cálculo das perdas de percurso do sinal em um ambiente móvel, constata-se a utilização de três categorias básicas de modelos :

- Modelos de Propagação
- Modelos de Difração
- Modelos de Reflexão

Cada uma dessas categorias descreve um tipo de efeito experimentado pelo sinal, durante o caminho da propagação por um perfil topográfico. Certamente, a intensidade com que cada um desses efeitos irá contribuir no nível do sinal é condicionada pelas condições de contorno dadas pelo ambiente de propagação.

Um ponto que deve ser abordado é o fato de os modelos empíricos em geral serem construídos com base em algum tipo de formulação teórica. Essas formulações descrevem casos simples e ideais, sendo que os modelos, normalmente, agregam a essas equações básicas um fator empírico. Dessa forma cabe, no início desse capítulo, uma seção que descreva os principais modelos teóricos utilizados como base.

2.1 Modelos Teóricos Básicos

Utilizados na concepção dos diversos métodos e modelos empíricos para o cálculo da propagação de sinais, os modelos teóricos básicos descrevem situações ideais, nas quais, em decorrência das simplificações impostas, é possível um modelamento matemático exato. Os modelos teóricos mais utilizados pelas metodologias empíricas são :

- Modelo da Propagação no Espaço Livre
- Modelo do Terreno Plano
- Modelo de Difração para uma Obstrução

Na seqüência dessa seção será feita uma descrição de cada um desses modelos teóricos básicos.

2.1.1 Propagação no Espaço Livre

A propagação de sinais no espaço livre, devido à ausência de quaisquer fatores de interferência no sinal, como ondas refletidas e efeitos de difração, fica condicionada apenas à distância d entre a transmissão e recepção e o comprimento de onda do sinal se propagando λ . A relação entre as potências do sinal transmitido e recebido [1], w_t e w_r , é definida como :

$$\frac{w_r}{w_t} = \frac{G_r}{G_t} \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (2.1)$$

Essa equação é conhecida como a fórmula de Friis para transmissão no espaço livre, onde G_t e G_r são os ganhos das antenas transmissora e receptora, respectivamente. Considerando o caso de antenas sem perdas e isotrópicas ($G_t = G_r = 1$), a Equação 2.1 em decibéis fornece :

$$L_F = 10 \log \left(\frac{w_t}{w_r} \right) = 20 \log(f) + 20 \log(d) + 32,44 \text{ dB} \quad (2.2)$$

onde f é dado em megahertz, d em quilômetros.

Observando a Equação 2.2 verifica-se que um sinal com uma determinada frequência tem a perda na propagação pelo espaço livre definida por uma reta com inclinação de 20 dB/década em relação à distância.

2.1.2 Modelo do Terreno Plano

Um sinal de rádio na recepção, após sua propagação por um terreno plano, se constitui praticamente da combinação da onda direta com uma onda refletida. Esse fenômeno é ilustrado pela Figura 2.1, sendo modelado pela seguinte equação [1] :

$$\frac{w_r}{w_t} = G_t G_r \left(\frac{h_t h_r}{d^2} \right)^2 \quad (2.3)$$

Como pode-se constatar nesse modelo, as perdas do sinal ficam condicionadas a fatores não considerados na propagação pelo espaço livre (Equação 2.1) como as alturas das antenas envolvidas. Outro ponto interessante do modelo é que a relação de potências independe da frequência do sinal.

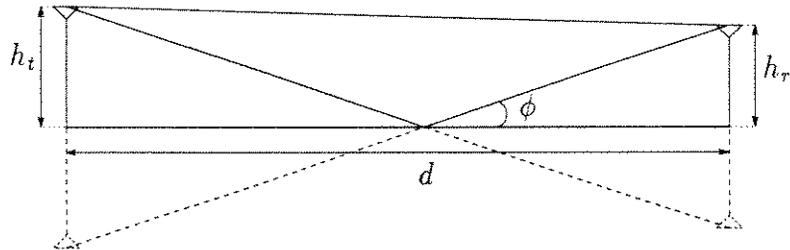


Figura 2.1: Propagação de um sinal em um terreno plano.

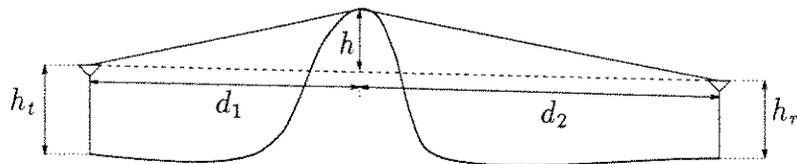


Figura 2.2: Difração devido a uma obstrução.

Considerando $G_t = G_r = 1$, a Equação 2.3 em decibéis fornece :

$$L_P = -20 \log(h_t h_r) + 40 \log(d) \text{ dB} \quad (2.4)$$

Nesse caso, a perda devido à propagação é definida como uma reta com inclinação de 40 dB/década com relação à distância.

2.1.3 Modelo de Difração para uma Obstrução

Na propagação de sinais em condições obstrutivas, existe a necessidade da consideração das perdas por difração.

No caso da propagação por um caminho com apenas uma obstrução, os modelos teóricos exatos são relativamente simples. À medida em que o número de obstruções cresce, a complexidade do problema aumenta muito, inviabilizando o uso de modelos teóricos.

No modelamento das perdas por difração devido a uma obstrução (Figura 2.2), utiliza-se, na grande maioria das aplicações, uma aproximação da integral complexa de Fresnel [32]. Uma boa aproximação do modelo teórico é

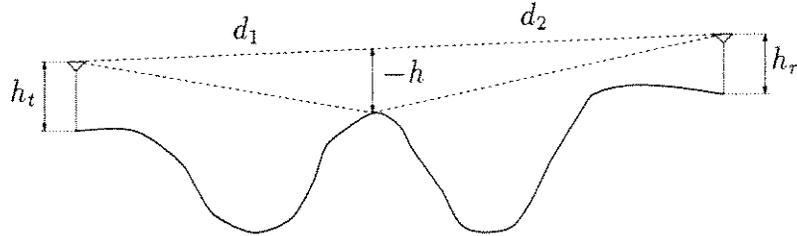


Figura 2.3: Situação de ganho devido a uma obstrução.

o conjunto de expressões dados por Lee [33] :

$$L_{Dif}(\nu) = \begin{cases} 0 & 1 \leq \nu \\ 20 \log \left(\frac{1}{2} + 0,62\nu \right) & 0 \leq \nu < 1 \\ 20 \log \left(\frac{e^{0,95\nu}}{2} \right) & -1 \leq \nu < 0 \\ 20 \log \left[0,4 - \sqrt{0,1184 - \left(\frac{\nu}{10} + 0,38 \right)^2} \right] & -2,4 \leq \nu < -1 \\ 20 \log \left(-\frac{0,225}{\nu} \right) & \nu < -2,4 \end{cases} \quad (2.5)$$

onde

$$\nu = -h \sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2}} \quad (2.6)$$

Pela Equação 2.5, existe a possibilidade de ocorrência de um ganho no sinal devido a difração quando $0,8065 \leq \nu < 1$. O motivo para tanto é a consideração da possibilidade de ocorrência de uma reflexão construtiva (Figura 2.3), pois, nessa situação, o elipsóide de Fresnel fica obstruído em uma porção muito pequena, que não envolve a linha de visada direta da antena transmissora até a receptora. De fato, as equações do modelo teórico exato fornecem ganho no sinal para a referida faixa de ν , além de ganhos e perdas para $\nu \geq 1$. Nessa última situação, as expressões propostas por Lee (Equação 2.5) divergem do modelo exato pois $L_{Dif}(\nu \geq 1) = 0$, apesar dessas diferenças serem suficientemente pequenas nunca ultrapassando 2 decibéis.

Deve ser destacado que o modelo teórico calcula as perdas por difração de uma obstrução do tipo gume de faca, sendo aplicável, com as devidas aproximações, às situações reais de sombreamento.

2.2 Métodos de Propagação

Os métodos que descrevem a propagação de um sinal consistem em procedimentos que se utilizam de um ou mais modelos. Todos esses métodos utilizam-se necessariamente, de algum tipo de modelo de propagação. Esses modelos descrevem as perdas decorrentes do desvanecimento do sinal em função da sua frequência, da distância percorrida no caminho da propagação, características da morfologia do ambiente, e dos dados das antenas transmissora e receptora. Em sua maioria, os modelos descrevem as perdas através de curvas obtidas experimentalmente, ou por formulações definidas a partir de processos de ajuste de pontos experimentais.

Dentre os métodos de propagação, o de Okumura [10] se destaca devido a sua grande abrangência de aplicabilidade. Esse método, inclusive, foi oficialmente adotado pelo ITU-R¹ para cálculos de perda de propagação na faixa de UHF, na qual reside a maioria das aplicações em comunicações móveis. Devido a essas características do método de Okumura, alguns trabalhos, como a formulação de Hata [15] e a modificação de Akeyama [16], foram dedicados a incrementar o método inicialmente proposto, de tal forma a facilitar a sua aplicação, e ampliar ainda mais a sua abrangência.

Outros métodos também merecem destaque no escopo de aplicações específicas. O método proposto por Ibrahim e Parsons [19] apresenta resultados muito próximos da realidade, quando na predição da propagação em áreas urbanas. Já o método de Lee [18] se ajusta muito bem para qualquer tipo de morfologia no terreno quando se trata de sinais na faixa de 900 megahertz. No método de Lee é introduzido ainda o conceito de predição ponto a ponto. Esse conceito será discutido com maiores detalhes na Seção 2.2.4, se constituindo em uma interessante contribuição na melhoria dos algoritmos das metodologias empíricas.

2.2.1 Método de Okumura

O método de Okumura é baseado em uma série de medidas experimentais obtidas em áreas urbanas com terreno quase plano na região de Tóquio, Japão. Através desses dados obtidos experimentalmente, Okumura *et al.* [10] propuseram o método que consiste na combinação da fórmula da propagação de sinais no espaço livre (Equação 2.2) com fatores de correção, sendo esses fa-

¹International Telecommunications Union - Radiocomunications Standardization Sector.

tores dependentes das características do sistema e do ambiente de propagação do sinal.

A formulação básica do método leva em consideração, além da perda L_F no espaço livre, três desses fatores (A_m , H_t , H_r), tais que :

$$L = L_F + A_m(f, d) + H_t(h_t, d) + H_r(h_r, d) \text{ dB} \quad (2.7)$$

onde,

- L : Perda média do sinal em decibéis para uma região urbana e terreno quase plano.
- $A_m(f, d)$: Atenuação média do sinal em decibéis em relação ao espaço livre em uma região urbana e terreno quase plano, com uma antena transmissora de 200 metros, e antena veicular de 3 metros. Essa atenuação é obtida com os dados da frequência do sinal f em megahertz e distância entre recepção e transmissão d em quilômetros nas curvas da Figura 2.4.
- $H_t(h_t, d)$: Fator de correção da antena transmissora em decibéis obtido com a altura da antena da transmissão h_t em metros e distância d através das curvas da Figura 2.5.
- $H_r(h_r, d)$: Fator de correção da antena receptora, em dB , obtido com a altura da antena da recepção h_r em metros e distância d através das curvas da Figura 2.6.

A Equação 2.7 provê resultados apenas para áreas urbanas em terreno quase plano. Portanto para qualquer outro tipo de ambiente de propagação existe a necessidade de introduzir outros fatores de correção. Okumura *et al.* [10] publicaram ainda uma série de fatores na forma gráfica que exprimem as características de uma área aberta, de uma área quase aberta, de uma área suburbana, do efeito da rugosidade do terreno, de uma montanha isolada, de um terreno inclinado, de regiões com lagos, além de considerações sobre a orientação de ruas em áreas urbanas. Dessa forma a proposição básica de Okumura pode ser estendida para atender as características específicas de cada região, apenas pela adição de outros fatores de correção (K_i).

$$L_{Total} = L + \sum_i K_i \text{ dB} \quad (2.8)$$

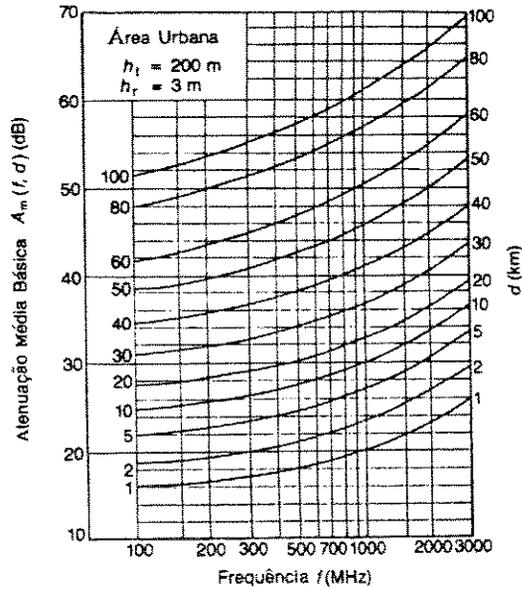


Figura 2.4: Atenuação média do sinal em uma região urbana, em relação ao espaço livre.

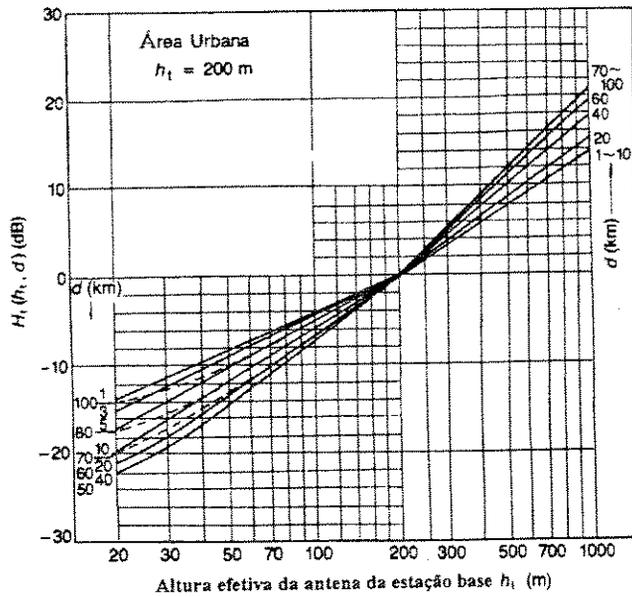


Figura 2.5: Curvas para a predição do ganho da antena na transmissão em relação a uma antena de 200m, em função da distância.

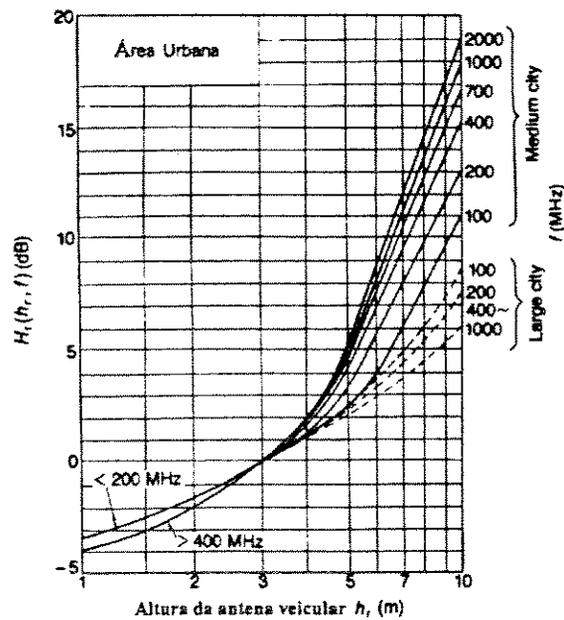


Figura 2.6: Curvas de predição do ganho da antena veicular.

Portanto, esse método apresenta uma grande flexibilidade, sendo aplicável para uma grande faixa de situações. No aspecto de implementação computacional, o método não apresenta grandes dificuldades, existindo apenas a necessidade de guardar alguns pontos de cada um dos gráficos, e utilizar algum método eficiente de interpolação para recuperar a informação desses gráficos. A dificuldade reside em obter critérios de decisão automáticos eficientes para definir quais gráficos e curvas serão utilizados, ou seja, caracterizar determinado problema dentro do espaço de curvas que o método apresenta. Essa dificuldade é decorrente do fato do método se basear numa série de conceitos subjetivos. Por exemplo, os conceitos de área urbana e suburbana são subjetivos, já que variam de acordo com cada país, cidade ou localidade. Fica difícil então afirmar se curvas obtidas em Tóquio ou em Londres podem ser aplicadas em predições para a cidade de São Paulo, ou ainda para outras regiões densamente povoadas. Como as curvas do modelo de Okumura foram todas extraídas de regiões típicas do Japão, certamente reside aí uma fonte de imprecisão quando o modelo é aplicado a outros países.

Tabela 2.1: *Formulação de Hata - Fator de correção $a(h_r)$.*

Categoria da Cidade	$a(h_r)$	Restrição
Pequena	$(1,1 \log(f) - 0,7)h_r -$ $(1,56 \log(f) - 0,8)$	$1 \leq h_r \leq 10 m$
Média		
Grande	$8,29 \log^2(1,54 h_r) - 1,1$	$f \leq 200 MHz$
	$3,2 \log^2(11,75 h_r) - 4,97$	$f \geq 400 MHz$

2.2.2 Formulação de Hata

Com o intuito de facilitar a implementação computacional do método de Okumura, Hata [15] desenvolveu uma série de fórmulas empíricas que descrevem com boa precisão as principais informações gráficas contidas no método de Okumura. Essas fórmulas apresentam desvios que nunca ultrapassam 1 decibel, mas existem restrições quanto a faixa de aplicabilidade dos parâmetros de entrada. A formulação ainda tem a restrição do fato de só ser aplicável em situações em que o terreno é quase plano, afinal não leva em consideração os fatores de correção de Okumura relacionados a terrenos acidentados. Outra limitação da formulação é verificada na predição da propagação sobre regiões de múltiplas morfologias, sendo que essa limitação é discutida com maiores detalhes no Apêndice A.

O conjunto das fórmulas de Hata abrange as seguintes situações :

- *ÁREAS URBANAS*

$$L = 69,55 + 26,16 \log(f) - 13,82 \log(h_t) - a(h_r) + (44,9 - 6,55 \log(h_t)) \log(d) \text{ dB} \quad (2.9)$$

onde

$$\begin{aligned} 150 &\leq f \leq 1500 && (f \text{ em megahertz}) \\ 30 &\leq h_t \leq 200 && (h_t \text{ em metros}) \\ 1 &\leq d \leq 20 && (d \text{ em quilômetros}) \end{aligned}$$

$a(h_r)$ é um fator de correção em decibéis, que é função da altura da antena do móvel h_r , em metros, calculado a partir das fórmulas apresentadas na Tabela 2.1.

- *ÁREAS SUBURBANAS*

$$L = L(\text{Área Urbana}) - 2 \log^2 \left(\frac{f}{28} \right) - 5,4 \text{ dB} \quad (2.10)$$

- *ÁREAS ABERTAS*

$$L = L(\text{Área Urbana}) - 4,78 \log^2(f) + 18,33 \log(f) - 40,94 \text{ dB} \quad (2.11)$$

Pode-se observar que a formulação de Hata tem boa aplicabilidade prática, pois permite uma implementação computacional bastante simples. Os resultados obtidos são bons em geral, apresentando por sua própria natureza uma tendência a resultados otimistas² quando em terrenos irregulares. Nesses casos a formulação sugere perdas na propagação do sinal menores que as medidas na prática, afinal não considera as perdas por difração do sinal devido às obstruções no terreno.

Para contornar essa dificuldade da formulação, quando se trata de terrenos acidentados, é possível uma combinação com algum modelo para cálculo de perdas por difração.

Como mencionado no início dessa seção, a aplicabilidade da formulação de Hata está restrita a determinadas faixas dos parâmetros de entrada. Devido a grande difusão dessa formulação na predição da propagação de sinais de rádio, alguns trabalhos foram desenvolvidos com o objetivo de ampliar essas faixas de aplicação.

A primeira extensão da formulação abordada é um trabalho desenvolvido pelo grupo Euro-COST231 [24] que propôs um fator de correção para ampliar a faixa de frequências :

$$K_{COST231} = -23,25 + 7,74 \log(f) \quad (2.12)$$

O fator $K_{COST231}$ deve ser somado às perdas calculadas pela formulação de Hata original quando o sistema opera em frequências na faixa de 1,5 a 2,0 gigahertz.

Outra extensão da formulação de Hata desenvolvida é apresentada por Hess [34]. Com o intuito de ampliar a faixa de aplicabilidade da formulação

²O termo *otimista* se refere ao fato de as perdas na propagação obtidas pela formulação de Hata serem normalmente menores que os valores medidos na prática.

para distâncias maiores do que 20 quilômetros, foram desenvolvidos dois fatores de correção :

$$K_{20km} = (d - 20) \left[0,31082 + 0,1865 \log \left(\frac{h_t}{100} \right) \right] \quad (2.13)$$

$$K_{64km} = -0,174 (d - 64,36) \quad (2.14)$$

onde d é a distância entre as antenas dada em quilômetros.

O fator de correção K_{20km} é adicionado aos cálculos da formulação de Hata original quando a distância entre a estação rádio base e a unidade móvel for maior do que 20 quilômetros, sendo que K_{64km} é adicionado quando essa distância ultrapassar 64,36 quilômetros.

2.2.3 Modificação de Akeyama

A questão da subjetividade de alguns conceitos como o de área urbana, suburbana, na aplicação do método de Okumura (Seção 2.2.1), motivaram Akeyama *et al.* [16] a desenvolverem fórmulas empíricas baseadas em um fator de urbanização (α). O intuito dessas fórmulas é quantificar algumas das características relacionadas com o meio urbano para corrigir a curva de perdas pela propagação de sinais em meio urbano do método de Okumura, com a adição do fator $K_{Akeyama}$ calculado a partir da correlação existente com α , como a seguir :

$$K_{Akeyama} = \begin{cases} 20 & \alpha \leq 1\% \\ -3,74 \log(\alpha) - 9,75 \log^2 \alpha + 20 & 1 < \alpha < 5\% \\ -19 \log(\alpha) + 26 & 5 \leq \alpha \leq 40\% \end{cases} \quad dB \quad (2.15)$$

A definição do fator α foi introduzida por Kozono e Watanabe [35], como sendo o percentual de área coberta por edifícios em áreas urbanas, isto é :

$$\alpha = \frac{\text{Área ocupada por edifícios}}{\text{Área total}} \times 100 \quad [\%] \quad (2.16)$$

O fator $K_{Akeyama}$ é acoplado no método de Okumura como um fator de correção, K_i , da Equação 2.8, substituindo curvas propostas por Okumura *et al.* [10] para representar as perdas da propagação em ambientes suburbano, urbano denso e áreas abertas.

Portanto, a modificação de Akeyama consiste numa melhoria para o método de Okumura no sentido em que elimina algumas de suas subjetividades aumentando, dessa forma, a faixa de aplicabilidade do método no que se refere à propagação de sinais em áreas urbanas.

2.2.4 Método de Lee

O método de Lee [18], da mesma forma que o de Okumura, é baseado em dados experimentais. Esses dados são utilizados na definição de um modelo de propagação por área definido pela Equação 2.17.

O procedimento da metodologia proposta por Lee se constitui em um processo de predição ponto a ponto. Em uma primeira etapa, o método calcula as perdas da propagação do sinal através de seu modelo por área. Em seguida, como exige a predição ponto a ponto, é verificada a existência de obstruções no caminho do sinal se propagando. O fato de o caminho estar obstruído significa que o sinal na recepção é composto principalmente da onda direta atenuada pelo efeito das obstruções. Dessa forma, existe a necessidade de incluir as perdas por difração do sinal, que podem ser calculadas por qualquer modelo, alguns dos quais descritos na Seção 2.3. Caso contrário, caminho livre de obstruções, o sinal na recepção será a combinação da onda direta com outras ondas refletidas. Esse efeito pode ser representado por qualquer um dos modelos da Seção 2.4. Especificamente para o seu método, Lee propõe a utilização do modelo da altura efetiva (Seção 2.4.2) para representar o efeito de reflexão do sinal a ser adicionado nos cálculos.

Assim, como descrito, o método de Lee se utiliza de modelos de propagação, difração e reflexão para a realização de seu procedimento ponto a ponto. Quanto aos métodos ponto a ponto, o grande mérito é verificado através de comparações com outras metodologias, como os métodos de propagação por área. Os resultados demonstram que os métodos ponto a ponto apresentam desvios bem menores [18], ou seja, uma confiabilidade nos resultados bem maior.

Portanto o método de Lee, por utilizar predição ponto a ponto, apresenta bons resultados sem um grande aumento das dificuldades de implementação. A principal limitação do método reside no fato de ser aplicável com confiabilidade apenas na faixa de 900 megahertz. Os motivos dessa limitação serão demonstrados no Apêndice A.

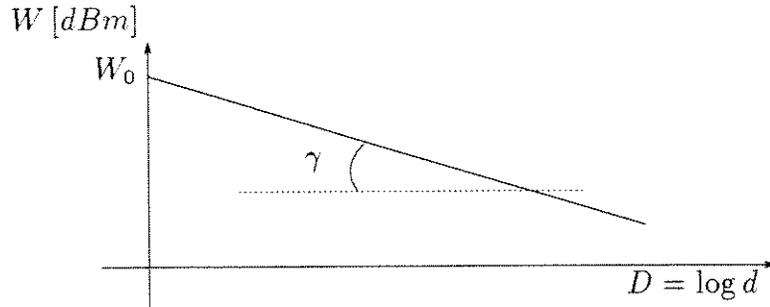


Figura 2.7: Perdas por propagação em uma dada morfologia.

Modelo de Propagação por Área

Como já mencionado, o modelo de propagação por área do método de Lee é utilizado na primeira etapa dos cálculos. O propósito desse modelo é a predição da potência do sinal em um terreno plano em função do tipo de morfologia desse terreno. Essa potência é calculada pela seguinte fórmula :

$$W = W_0 - \gamma \log(d) - n \log\left(\frac{f}{900}\right) + \delta \text{ dB} \quad (2.17)$$

onde

- W : Potência média do sinal em decibéis para uma determinada morfologia.
- W_0 : Potência do sinal à distância de uma milha do transmissor.
- γ : Coeficiente angular da reta de perdas em uma determinada morfologia.
- d : Distância entre o transmissor e o receptor em milhas.
- n : Fator de compensação de frequência.
- f : Frequência de operação do sistema em megahertz.
- δ : Fator de ajuste para condições de operação.

Na Equação 2.17, os valores de γ e W_0 são obtidos com o auxílio de retas (Figura 2.7), determinadas a partir dos pontos experimentais. Essas retas caracterizam as perdas do sinal em função da distância para cada tipo de

morfologia. De forma semelhante, o fator de compensação de frequência n também é obtido de forma empírica³.

O último termo da Equação 2.17 é o fator de ajuste para condições de operação (δ), calculado por :

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4 + \delta_5 \quad (2.18)$$

onde cada um dos δ_i é dado por :

$$\delta_1 = 20 \log \left(\frac{h_t}{30,48} \right) \text{ dB} \quad (2.19)$$

$$\delta_2 = \begin{cases} 10 \log \left(\frac{h_r}{3} \right) & h_r < 3 \text{ m} \\ 20 \log \left(\frac{h_r}{3} \right) & 3 \leq h_r < 10 \text{ m} \end{cases} \quad (2.20)$$

$$\delta_3 = 10 \log \left(\frac{P_t}{10} \right) \quad (2.21)$$

$$\delta_4 = G_t - 6 \quad (2.22)$$

$$\delta_5 = G_r \quad (2.23)$$

onde, P_t é a potência da antena transmissora em watts e, G_t e G_r são os ganhos das antenas transmissora e receptora.

O modelo de propagação por área de Lee pode ser estendido para o caso de múltiplas morfologias. Nessa situação, a equação do modelo para N morfologias fornece :

$$W = -W_0 - \delta + \gamma_N \log(d) - \sum_{i=1}^{N-1} (\gamma_{i+1} - \gamma_i) \log(d_i) \quad (2.24)$$

A Figura 2.8 ilustra o processo de composição de retas para o caso de múltiplas morfologias.

2.2.5 Método de Ibrahim-Parsons

Ibrahim e Parsons estruturaram seu método empírico para a predição da propagação de sinais em áreas urbanas [19], baseados na análise de dados experimentais obtidos na cidade de Londres. A partir do ajuste desses dados, obtiveram duas fórmulas, uma empírica e outra semi-empírica. Essas equações levam

³No Apêndice A são dadas maiores informações sobre o fator n , e sua relação com a limitação do método de Lee.

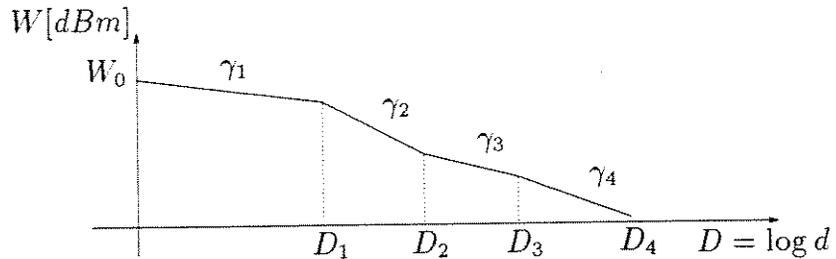


Figura 2.8: Propagação por quatro morfologias diferentes.

em consideração fatores tradicionais como frequência de operação f em megahertz, altura da antena transmissora h_t em metros, altura da antena receptora h_r em metros, e distância entre recepção e transmissão d em quilômetros. Para uma descrição mais precisa das regiões urbanas, outros fatores foram introduzidos devido à grande correlação existente com o nível do sinal se propagando no meio urbano. Esses fatores ou parâmetros utilizados pelo método são :

- Fator de grau de urbanização (U) : percentual de área coberta por edifícios com mais de quatro andares de altura.
- Fator de urbanização (F) : percentual de área coberta por edificações.
- Parâmetro da altura relativa do móvel (H) : diferença entre a altura média do terreno na região em torno da antena transmissora e a altura média do terreno na região em torno da antena receptora.

Deve-se observar que esses fatores podem ser obtidos de forma bastante simples. Determina-se o parâmetro H através da análise da carta topográfica das regiões onde se localizam as antenas. Os fatores U e F podem ser obtidos com dados disponíveis da prefeitura local.

O modelo empírico proposto foi baseado na análise de múltiplas regressões para os dados experimentais. A formulação obtida foi :

$$L = -20 \log(0,7h_t) - 8 \log(h_r) + \frac{f}{40} + 26 \log\left(\frac{f}{40}\right) - 86 \log\left(\frac{f+100}{156}\right) + \left[40 + 14,15 \log\left(\frac{f+100}{156}\right)\right] \log(d) + 0,265F - 0,37H + K_1 \quad (2.25)$$

onde

$$K_1 = \begin{cases} 0,087U - 5,5 & \text{Região central da cidade} \\ 0 & \text{Outros lugares} \end{cases}$$

O modelo semi-empírico é baseado na equação do terreno plano (Equação 2.4) corrigida por um fator de excesso (β) como mostra a equação a seguir :

$$L = \overbrace{40 \log(d) - 20 \log(h_r h_t)}^{L_P} + \beta \quad (2.26)$$

onde

$$\beta = 20 + \left(\frac{f}{40}\right) + 0,18L - 0,34H + K_2$$

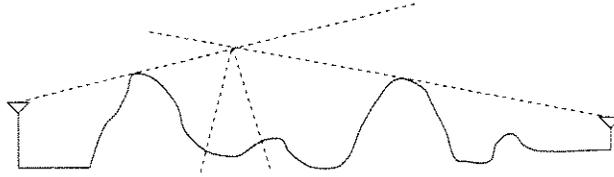
e

$$K_2 = \begin{cases} 0,094U - 5,9 & \text{Região central da cidade} \\ 0 & \text{Outros lugares} \end{cases}$$

Ambos os modelos apresentam boa correlação de seus resultados com os dados experimentais. Para verificar os modelos obtidos, esses foram submetidos a comparações com os dados obtidos por Allsebrook [11] em outras cidades do Reino Unido. A comparação comprova o bom desempenho desse método quando se trata de propagação de sinais em áreas urbanas.

2.3 Modelos de Difração

Uma extensão da teoria de difração simples (Seção 2.1.3) para múltiplas obstruções do tipo gume de faca é um problema complicado. Matematicamente esse problema recai em equações muito complexas. Já foram encontradas soluções relativamente simples para o caso de duas obstruções [32], sendo que

Figura 2.9: *Modelo de Bullington*

para o caso de mais de duas obstruções, as soluções exatas são ainda muito complexas. Por esses motivos os modelos empíricos são os mais utilizados. Esses modelos se utilizam, em sua maioria, de artifícios de geometria plana para reduzir o problema de múltiplas obstruções para um caso mais simplificado. Esses modelos apresentam resultados muito precisos, com um custo computacional bastante reduzido. Dessa forma, fica clara a preferência por esse tipo de modelamento.

2.3.1 Modelo de Bullington

A proposição do modelo de Bullington [4], para o cálculo da difração por múltiplas obstruções, consiste em reduzir o problema de um terreno acidentado a uma obstrução equivalente. O processo de equivalência é ilustrado pela Figura 2.9 e consiste em obter duas retas tangentes às obstruções dominantes, e no ponto de cruzamento dessas duas retas fica determinada a altura e a posição da obstrução equivalente.

Originalmente o modelo foi desenvolvido para resolver o problema da difração devido a duas obstruções [1] e, conseqüentemente, o modelo apresenta melhores resultados para essa situação. Os cálculos para um número maior de obstruções geram resultados quase sempre otimistas⁴, afinal o modelo ignora a influência de diversos obstáculos na redução do problema. A grande vantagem desse modelo é a sua simplicidade de aplicação.

2.3.2 Modelo de Deygout

O cálculo de perdas por difração devido a múltiplos obstáculos desenvolvido por Deygout [9] é fundamentado na aplicação de um algoritmo recursivo. No primeiro passo do algoritmo, o objetivo é encontrar a obstrução principal no

⁴O termo otimista se refere ao fato de as perdas por difração obtidas pelo modelo de Bullington serem normalmente menores que os valores medidos na prática.

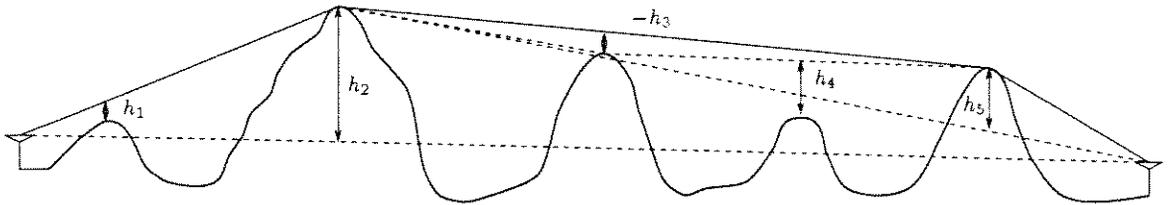


Figura 2.10: Modelo de Deygout

terreno, a qual é definida como a obstrução que isoladamente gera a maior perda por difração da onda direta. Em seguida, calcula-se a perda por difração entre a transmissão e a obstrução principal, somada à perda entre a recepção e a obstrução principal. A esse resultado, adiciona-se a perda por difração da obstrução principal, calculada isoladamente. O algoritmo é recursivo no sentido que, caso exista, por exemplo, mais de uma obstrução entre a transmissão e a obstrução principal, o algoritmo se repete para esse novo caminho. A Figura 2.10 ilustra a aplicação do algoritmo sendo que a perda total é dada por :

$$L_{Deygout} = \sum_{i=1}^n L_{Dif}(v(h_i)) \quad (2.27)$$

onde L_{Dif} é dada pela Equação 2.5.

O modelo de Deygout apresenta resultados bastante satisfatórios. Um estudo comparativo feito por Pogorzelski [36] mostra que o modelo é muito preciso em quase todas as situações, divergindo, de forma acentuada, dos valores medidos na prática, apenas em situações onde existem várias obstruções muito próximas umas das outras. Apesar disso essa divergência é pessimista, ou seja, a aplicação do método normalmente resulta em perdas maiores que os resultados experimentais. A grande vantagem desse modelo é a boa precisão dos resultados, sem que existam grandes dificuldades para a implementação.

2.3.3 Modelo de Giovanelli

O modelo de Giovanelli [17] é muito semelhante ao de Deygout. Na realidade ele constitui uma derivação desse método. O grande mérito de Giovanelli foi eliminar de forma bastante conclusiva algumas das imprecisões do modelo de Deygout. Comparações mostram grande proximidade dos resultados com os obtidos experimentalmente, nunca apresentando divergências maiores que

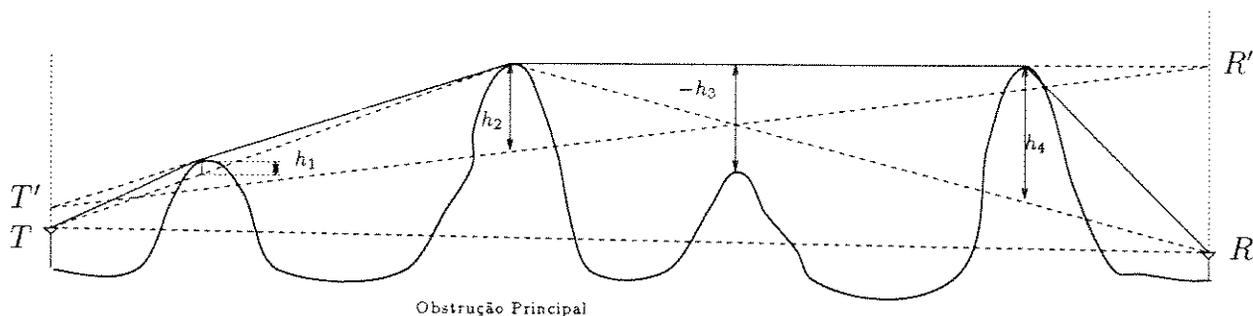


Figura 2.11: Modelo de Giovaneli.

1 decibel.

O modelo de Giovaneli, da mesma forma que o de Deygout, é aplicado de forma recursiva. Novamente, o processo consiste em encontrar uma obstrução principal e em seguida são calculadas as perdas por difração no caminho do transmissor até a obstrução principal, e desta até o móvel. A diferença para o método de Deygout está no cálculo da difração devido à obstrução principal. Para obter o valor de h_2 da obstrução principal, utiliza-se a reta $\overline{T'R'}$ como mostra a Figura 2.11, sendo que T' é obtido pelo prolongamento de uma reta que liga a obstrução principal ao morro dominante entre a transmissão e a obstrução principal, e R' pelo prolongamento de outra reta, agora ligando a mesma obstrução principal ao morro dominante entre recepção e a obstrução principal.

O modelo de Giovaneli tem a perda por difração total dada por :

$$L_{Giovaneli} = \sum_{i=1}^n L_{Dif}(\nu(h_i)) \quad (2.28)$$

onde os valores de h_i são os da Figura 2.11, e L_{Dif} é calculado pela Equação 2.5.

Os resultados apresentados por esse modelamento são bastante precisos, sendo esse o seu grande mérito. A complexidade para implementação aumenta um pouco com relação aos outros métodos, mas não de forma muito significativa.

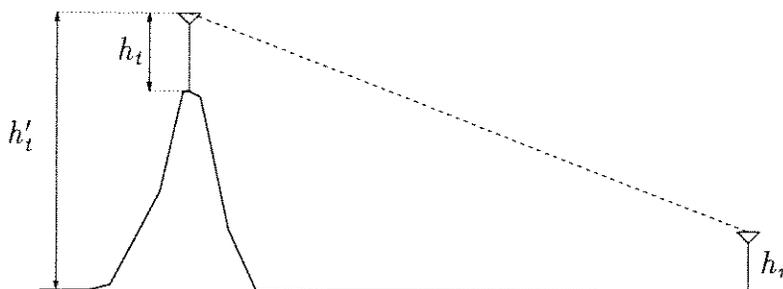


Figura 2.12: Altura Efetiva da Antena Transmissora (h'_t)

2.4 Modelos de Reflexão

Como já abordado na Seção 2.1.2, as perdas relativas à propagação em terreno plano dependem da altura da antena transmissora. Em situações não idealizadas, h_t , da Equação 2.4, deve ser interpretado como a altura efetiva da antena, h'_t , que consiste na altura da antena transmissora relativa à terra plana (Figura 2.12). Na maioria das situações, o posicionamento da antena transmissora é feito em locais mais altos com relação ao restante da área a ser coberta. Portanto, o efeito da altura efetiva da antena tem contribuição significativa no nível do sinal a ser calculado, na maioria dos casos. Assim, nos métodos de predição de cobertura, normalmente é previsto algum tipo de modelo para o cálculo da altura efetiva da antena transmissora, o que na realidade consiste em correções sobre o efeito da onda refletida do modelo de terreno plano original.

2.4.1 Altura Efetiva de Okumura

O cálculo da altura efetiva de Okumura pode ser derivado a partir dos dados publicados por Okumura *et. al.* [10]. Esse modelo exprime a altura efetiva média da antena transmissora em relação ao restante do perfil topográfico. Dessa forma a altura efetiva média h'_t é obtida pela diferença entre a altura da antena transmissora e a altura média do terreno entre as distâncias de 3 a 15 quilômetros da transmissão, como ilustra a Figura 2.13.

Nesse modelamento, após a obtenção do valor de h'_t , o ganho devido à altura efetiva deve ser calculado por :

$$K_{Okumura} = \begin{cases} 0 & h'_t \leq h_t \\ 20 \log \left(\frac{h'_t}{h_t} \right) & h'_t > h_t \end{cases} \quad dB \quad (2.29)$$

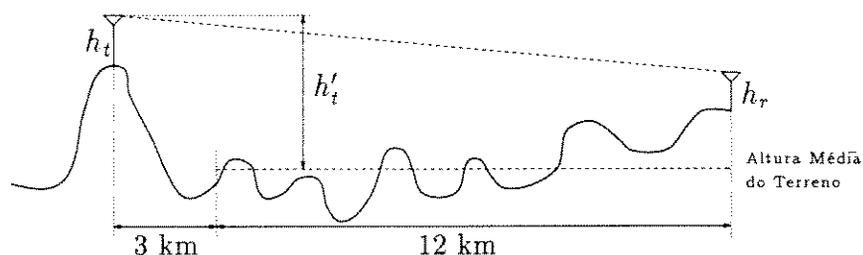


Figura 2.13: Altura Efetiva da Antena Transmissora de Okumura (h'_t)

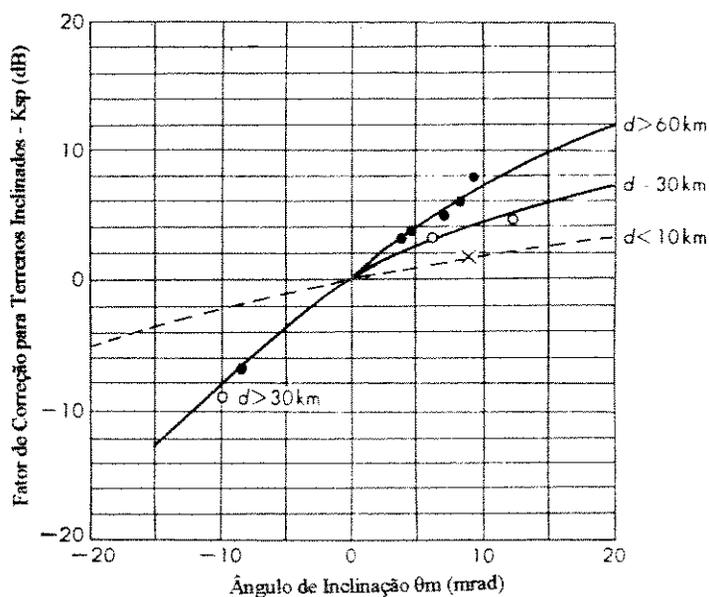


Figura 2.14: Fator de correção para terrenos inclinados (K_{sp}).

O ganho calculado deve ser adicionado aos resultados obtidos por um método de predição da propagação de sinais.

Esse modelo apresenta uma boa correlação com os dados experimentais de Okumura, os quais foram obtidos em terrenos quase planos. O modelo ainda abrange correções para situações onde o terreno é inclinado. Nesse caso é computado um fator de correção com o uso de uma curva experimental publicada por Okumura *et al.* (Figura 2.14), a qual relaciona o fator de correção para terrenos inclinados (K_{sp}) com o ângulo de inclinação θ_m .

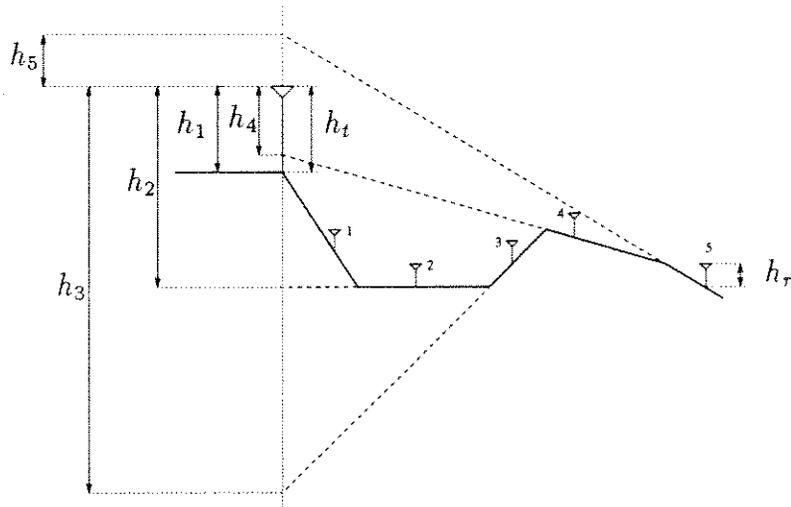


Figura 2.15: Altura Efetiva da Antena Transmissora de Lee (h_i)

2.4.2 Altura Efetiva de Lee

Para a obtenção da altura efetiva em seu método ponto a ponto, Lee propôs o modelo [18] baseado na propagação em terreno plano equivalente para cada ponto de um dado perfil topográfico. A forma de obtenção desse modelo equivalente é feita a partir do traçado de uma reta tangente ao contorno do terreno, no ponto onde se localiza a antena receptora. Na Figura 2.15 as alturas h_1 , h_2 , h_3 , h_4 e h_5 são relativas aos pontos 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente.

Após a obtenção do valor da altura efetiva (h_i), o ganho ou perda pode ser calculado por :

$$K_{Lee} = 20 \log \left(\frac{h_i}{h_t} \right) \text{ dB} \quad (2.30)$$

onde h_t é a altura da antena transmissora.

Fica claro pela Equação 2.30, que existe a possibilidade de uma perda devido a altura efetiva para a situação quando $h_i < h_t$, sendo que essa perda pode até chegar a infinito para os casos onde $h_i \leq 0$. Na descrição do modelo, Lee propõem um limitante inferior de -77 decibéis. Esse valor foi obtido de forma empírica através de dados experimentais.

Esse modelo tem aplicação computacional bastante simples, sendo que os resultados obtidos apresentam boa compatibilidade com dados experimentais obtidos por Lee em todas as situações abordadas na Figura 2.15.

2.5 Sumário

Os principais efeitos experimentados por um sinal, durante a sua propagação em um determinado perfil do terreno, são descritos por modelos de propagação, difração e reflexão.

Na primeira categoria, o modelo de propagação proposto por Okumura (Seção 2.2.1) é o mais difundido devido a sua flexibilidade, sendo normalmente aplicado através da formulação de Hata (Seção 2.2.2). Com o intuito de eliminar algumas das subjetividades do modelo de Okumura, a modificação de Akeyama (Seção 2.2.3) introduz o fator de urbanização α . Outros métodos destacados são os propostos por Lee (Seção 2.2.4) e Ibrahim-Parsons (Seção 2.2.5), sendo esse último eficiente na predição das perdas em regiões urbanas. Já o método de Lee introduz o conceito de predição ponto a ponto que significa um avanço nos procedimentos das metodologias de predição, dados os resultados mais precisos que são obtidos. Entretanto, existem limitações dos métodos que são discutidas em maiores detalhes no Apêndice A.

Os modelos de difração verificam os efeitos causados no sinal devido a obstruções no caminho de propagação do sinal. Todos os modelos abordados apresentam alguma característica particular que o destaca. Os modelos de Giovaneli (Seção 2.3.3) e Deygout (Seção 2.3.2) apresentam uma grande precisão nos resultados, além da proposição de algoritmos recursivos, os quais permitem verificar os efeitos de um número grande de obstruções sem um aumento na complexidade da implementação. Já o modelo de Bullington (Seção 2.3.1) apresenta maior simplicidade com resultados menos precisos.

A influência da altura efetiva da antena transmissora é verificada através dos modelos de reflexão. Os dois modelos abordados, Okumura (Seção 2.4.1) e Lee (Seção 2.4.2), possuem bons desempenhos sendo que o modelo de Lee apresenta uma maior simplicidade na implementação computacional.

Capítulo 3

Métodos Estatísticos

Os métodos empíricos para a predição de cobertura abordados no Capítulo 2 descrevem apenas a intensidade média do sinal numa dada localidade. Entretanto, mesmo com pequenos deslocamentos espaciais, grandes variações no nível do sinal na recepção são constatadas. Na necessidade de uma análise para avaliação dos efeitos desses pequenos deslocamentos, uma abordagem estatística é recomendada como alternativa.

Em uma análise estatística, o objetivo principal é tentar enquadrar o ambiente de propagação de tal forma a determinar quais modelos teóricos já desenvolvidos se aproximam melhor dos efeitos sofridos pelo sinal dentro desse ambiente. De forma análoga às metodologias empíricas, três fatores básicos são considerados em um modelo estatístico de um sinal se propagando :

- *Perdas de Percurso* : As perdas de percurso dizem respeito ao cálculo da média local do sinal recebido [37], podendo ser obtida através dos diversos métodos empíricos descritos no Capítulo 2.
- *Efeitos de Sombreamento* : Os efeitos de sombreamento na recepção são relativos a variações do sinal devido às obstruções no percurso da propagação. Essas variações ocorrem na média local do sinal afetando portanto apenas o desvanescimento de longo prazo¹ [18].
- *Efeitos de Multipercurso* : Os efeitos de multipercurso são relativos às diversas ondas refletidas que se compõem na antena receptora. Essas

¹Do inglês Long Term Fading (ver o Capítulo 4 desse documento).

ondas chegam por diferentes ângulos afetando apenas o desvanescimento de curto prazo do sinal² [18].

Portanto, de acordo com suas características, um ambiente de propagação pode ser descrito como uma combinação desses três fatores.

Após a modelagem estatística do ambiente de propagação, a principal aplicação prática para o modelo obtido é o cálculo da área de cobertura de uma dada estação rádio base. Dessa forma, na seqüência desse capítulo serão abordados os principais ambientes teóricos e seus modelos estatísticos associados, além de uma descrição de diferentes métodos para o cálculo da área de cobertura.

3.1 Ambientes de Propagação

No desenvolvimento da teoria estatística para a propagação de sinais de rádio, existe a necessidade da caracterização do ambiente em questão dentro do espaço de modelos teóricos desenvolvidos, sendo que a cada um desses ambientes teóricos está associada uma distribuição estatística de mesmo nome.

Dentre os ambientes que serão descritos a seguir, alguns modelam a influência de efeitos isolados como os ambientes Lognormal, Rayleigh, Rice e Nakagami, sendo que outros como o de Suzuki e Nakagami Sombreado descrevem combinações desses efeitos.

3.1.1 Ambiente Lognormal

Sinais se propagando em ambientes onde deve ser considerado o efeito de sombreamento tem sua componente de longo prazo (média local do sinal) modelada através de uma distribuição Lognormal [1]. Diversos experimentos já realizados [3, 27, 10, 38], comprovam esse modelo definido pela seguinte equação :

$$p_L(W) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_L} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{W - M_L}{\sigma_L} \right)^2 \right] \quad (3.1)$$

A Equação 3.1 é a densidade de probabilidade da potência do sinal, W , em decibéis, em um ambiente Lognormal, onde M_L é a média do sinal, em decibéis, e σ_L é a variância, também em decibéis. O valor de M_L é calculado através de qualquer metodologia de predição empírica onde é considerado o

²Do inglês Short Term Fading (ver o Capítulo 4 desse documento).

efeito das perdas de percurso. Já a variância σ_L deve ser obtida por medidas experimentais. Valores encontrados para essa variância residem na faixa de 1 a 11 decibéis [10, 27, 30, 38], sendo que essa variância cresce com o aumento da frequência do sinal [27] e com o aumento da área considerada [30].

Portanto, para uma descrição precisa de um ambiente Lognormal, existe a necessidade de medidas experimentais para uma avaliação do valor do desvio padrão σ_L em um dado ambiente.

3.1.2 Ambiente Rayleigh

Um sinal se propagando em um Ambiente Rayleigh tem a sua componente de curto prazo modelada por uma distribuição de Rayleigh. O efeito associado a essa distribuição é o de multipercurso, o qual afeta apenas o desvanecimento de curto prazo do sinal [18]. Para a caracterização do efeito de mutipercurso em um dado ambiente de propagação devem existir no mínimo dez ondas refletidas incidindo na antena receptora [3]. Uma consideração importante, feita no desenvolvimento teórico do modelo de Rayleigh, é o fato dos ângulos de chegada das múltiplas ondas refletidas na recepção serem condicionados por uma distribuição uniforme de probabilidades entre 0 e 2π radianos [1]. Experimentos já foram realizados [27, 38] comprovando o modelo baseado na função densidade de probabilidade de potência $p_r(w)$ do sinal mostrada a seguir :

$$p_r(w) = \frac{1}{m_r} \exp\left(-\frac{w}{m_r}\right) \quad (3.2)$$

onde m_r a média da densidade de Rayleigh, podendo ser obtida por qualquer método empírico descrito no Capítulo 2. A variância dessa distribuição é igual a média, ou seja $Var(w) = m_r$.

O efeito de multipercurso puro deve ser considerado apenas em situações onde o sinal na recepção é composto exclusivamente de ondas refletidas com amplitudes equivalentes. Portanto, não deve existir uma onda dominante chegando na recepção, ou seja, em situações de linha de visada direta entre a recepção e a transmissão o modelo estatístico de Rayleigh não se ajusta bem.

Em situações práticas, as regiões urbanas normalmente apresentam o efeito de multipercurso, e portanto podem ser modeladas também com o auxílio de uma distribuição de Rayleigh.

3.1.3 Ambiente Suzuki

Em ambientes onde se sobrepõem os efeitos de sombreamento e multipercurso, presume-se um modelamento estatístico resultado de uma combinação entre as distribuições Lognormal (Equação 3.1) e de Rayleigh (Equação 3.2). Essa distribuição estatística é conhecida como distribuição de Suzuki [1, 28, 29] :

$$p_s(w) = \sqrt{\frac{\pi}{8}} \frac{1}{\sigma_L} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{w}{10^{\frac{R}{10}}} \exp\left(-\frac{\pi w^2}{4(10)^{\frac{R}{10}}} - \frac{(R - M_L)^2}{2\sigma_L^2}\right) dR \quad (3.3)$$

onde,

$$R = 20 \log\left(\sqrt{\frac{\pi}{2}} m_r\right) \quad (3.4)$$

Na Equação 3.3, M_L e σ_L são, respectivamente, a média e o desvio padrão da distribuição Lognormal envolvida e, na Equação 3.4, m_r é relativo à distribuição de Rayleigh associada.

3.1.4 Ambiente Rice

A distribuição estatística de Rice é utilizada no modelamento de ambientes Rice, nos quais o sinal na recepção é composto pela combinação de uma onda dominante com diversas ondas refletidas de intensidade menor. A distribuição de Rice é definida como [1] :

$$p_R(x) = \frac{x}{\sigma_R^2} \exp\left(-\frac{x^2 + a^2}{2\sigma_R^2}\right) I_0\left(\frac{ax}{\sigma_R^2}\right) \quad (3.5)$$

onde $\frac{a^2}{2}$ e σ_R^2 são as potências das ondas direta e refletidas, respectivamente, e I_0 é a função de Bessel modificada de ordem 0, definida como :

$$I_0\left(\frac{ax}{\sigma_R^2}\right) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp\left(\frac{ax \cos \theta}{\sigma_R^2}\right) d\theta \quad (3.6)$$

Essa última equação pode ser desenvolvida numericamente pela seguinte forma [1] :

$$I_0(\alpha) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\alpha^i}{2^i i!} \quad (3.7)$$

A aplicação da distribuição de Rice no modelamento de ambientes de propagação é feita com o uso da densidade de probabilidade da potência do sinal, $p_R(w)$, dada pela seguinte equação [31] :

$$p_R(w) = \frac{1}{\sigma_R} \exp\left(-\frac{2w + a^2}{2\sigma_R}\right) I_0\left(\frac{a\sqrt{2w}}{\sigma_R}\right) \quad (3.8)$$

sendo que a média m_R da variável w é dada por :

$$m_R = \frac{a^2}{2} + \sigma_R \quad (3.9)$$

Da mesma forma que na distribuição de Rayleigh, no desenvolvimento teórico da distribuição de Rice é feita a suposição de que as ondas refletidas tem ângulos de chegada na recepção condicionados por uma distribuição uniforme de probabilidades entre 0 e 2π radianos. Portanto, a suposição de uma onda direta de potência 0 ($a = 0$), leva a Equação 3.8, como esperado, a uma distribuição de Rayleigh (Equação 3.2).

O modelo de ambientes Rice tem despertado um grande interesse prático no modelamento de ambientes fechados como o interior de edifícios [39], além de descrever o desvanescimento de curto prazo na propagação de sinais de EHF em regiões urbanas [3]. Dessa forma, no planejamento e projeto de sistemas de comunicação móvel em regiões urbanas, esse modelamento estatístico possui grande aplicabilidade.

3.1.5 Ambiente Nakagami

A distribuição estatística de Nakagami [25] foi introduzida para caracterizar o desvanescimento rápido da propagação de sinais de HF para longas distâncias. Através de um processo de inspeção de dados de campo [25], o modelo para ambientes Nakagami foi definido como :

$$p_N(x) = \frac{2m^m x^{2m-1}}{\Gamma(m)\Omega^m} \exp\left[-x^2 \left(\frac{m}{\Omega}\right)\right] \quad (3.10)$$

onde $\Omega = E[x^2]$, e m é o fator de desvanecimento definido por [31] :

$$m = \frac{\Omega}{5Var(x)} \quad (3.11)$$

Um aspecto da distribuição de Nakagami é o cálculo de sua média que é definida por [31] :

$$E[x] = \frac{\Gamma(m + \frac{1}{2})}{\Gamma(m)} \sqrt{\frac{\Omega}{m}} \quad (3.12)$$

onde,

$$\Gamma(m) = \int_0^{\infty} x^{m-1} \exp(-x) dx \quad (3.13)$$

Da mesma forma que na distribuição de Rice, pode-se obter ainda a distribuição de potência de uma variável Nakagami :

$$p_N(w) = \left(\frac{m}{m_N}\right)^m \frac{w^{m-1}}{\Gamma(m)} \exp\left(-\frac{mw}{m_N}\right) \quad (3.14)$$

onde $m_N = E[w]$ é a média da potência do sinal que pode ser calculada por qualquer metodologia empírica.

O grande mérito da distribuição de Nakagami, no modelamento do efeito de multipercurso, consiste na grande flexibilidade e simplicidade da sua formulação quando comparada a outras distribuições. Variações do fator de desvanecimento m permitem a adequação da distribuição de Nakagami para modelar as características de diferentes ambientes, no que se refere ao desvanecimento de curto prazo. Outro aspecto interessante é o fato de todas as distribuições estatísticas, com exceção da de Suzuki, abordadas nesse capítulo, serem casos particulares da distribuição de Nakagami. A partir de condições específicas do fator m , é possível obter as distribuições de Rayleigh, Rice e Lognormal, para um desvio padrão pequeno.

3.1.6 Ambiente Nakagami Sombreado

A formulação de um ambiente Nakagami Sombreado nada mais é do que a generalização da formulação de um ambiente Nakagami para atender variações na componente de longo prazo do sinal. Através das distribuições de potência de Nakagami (Equação 3.14) e Lognormal (Equação 3.1), pode-se obter, de forma análoga ao desenvolvimento da distribuição de Suzuki (Seção 3.1.3), a

distribuição de potência de uma variável Nakagami Sombreado [31], ou seja :

$$p_{NS}(w) = \int_0^{\infty} p_N(w/\bar{w})p_L(\bar{w}) d\bar{w} \quad (3.15)$$

onde $p_N(w/\bar{w})$ é a distribuição de Nakagami condicional dada por :

$$p_N(w/\bar{w}) = \left(\frac{m}{\bar{w}}\right)^m \frac{w^{m-1}}{\Gamma(m)} \exp\left(-\frac{mw}{\bar{w}}\right) \quad (3.16)$$

e $p_L(w)$ é a distribuição Lognormal na sua forma linear, ou seja :

$$p_L(\bar{w}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_L\bar{w}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{10\log\bar{w} - 10\log m_{NS}}{\sigma_L}\right)^2\right] \quad (3.17)$$

A substituição das Equações 3.16 e 3.17 na Equação 3.15 resulta :

$$p_{NS}(w) = K(m) \int_0^{\infty} \frac{w^{m-1}}{\bar{w}^{m+1}\sigma_L} \exp\left[-\frac{mw}{\bar{w}} - 50\left(\frac{\log\bar{w} - \log m_{NS}}{\sigma_L}\right)^2\right] d\bar{w} \quad (3.18)$$

onde,

$$K(m) = \frac{m^m}{\Gamma(m)\sqrt{2\pi}} \quad (3.19)$$

A Equação 3.18 é a distribuição Nakagami Sombreado, onde σ_L é o desvio padrão da distribuição Lognormal associada, m_{NS} é a média da variável Nakagami Sombreado e, m é o fator de desvanecimento da distribuição de Nakagami relacionada.

A distribuição Nakagami Sombreado, por ser uma generalização da distribuição de Nakagami, possui também a característica de poder derivar outras distribuições estatísticas³. A partir de condições específicas do fator de desvanecimento m e da variância σ_L , a distribuição Nakagami Sombreado pode derivar todas as distribuições estatísticas descritas nesse capítulo, ou seja, possui uma grande flexibilidade no modelamento da estatística de sinais se propagando.

³O Apêndice B desse documento faz uma descrição detalhada dessa característica da distribuição Nakagami Sombreado.

3.2 Cálculo da Área de Cobertura

A principal aplicação prática para os modelos descritos na Seção 3.1 é o cálculo da área de cobertura. A partir das características de uma antena transmissora, e do modelo estatístico do ambiente de propagação, pode-se determinar o raio de cobertura da referida antena. Uma predição precisa desse raio tem grande importância, principalmente na fase de projeto de um sistema rádio-móvel. Nessa etapa são definidas as posições das antenas com base nos resultados obtidos por essas predições.

Portanto, a qualidade de um projeto rádio-móvel está diretamente ligada aos resultados dessas simulações, que, além de determinar a cobertura das antenas, permite ainda verificar as interferências sofridas devido às antenas adjacentes.

3.2.1 Método da Proporção do Perímetro

O cálculo da área de cobertura através dessa abordagem é baseado na proporção β das localidades a uma distância r do transmissor, que possuem um sinal maior ou igual a um dado limiar de potência W_0 . É fácil observar, por essa definição da variável β , que existe a suposição de uma área de cobertura circular de raio r em torno da antena transmissora, ou seja, a variável r define a área de cobertura celular. A expressão de β é dada por :

$$\beta = \text{prob}(W \geq W_0) = \int_{W_0}^{\infty} p(W) dW \quad (3.20)$$

onde $p(W)$ é a função densidade de potência do sinal que modela o ambiente de propagação em questão.

Portanto, a expressão da variável β pode ser desenvolvida para todos os ambientes de propagação descritos nesse capítulo. Os desenvolvimentos dessas fórmulas que relacionam β com o raio de cobertura r , podem ser obtidos na literatura [31, 39], não havendo portanto a necessidade de maiores detalhes acerca desse assunto.

Cabe ainda ressaltar que no projeto de um sistema rádio-móvel o parâmetro β é comumente definido na fase de especificações. Dessa forma, a Equação 3.20 é utilizada freqüentemente para determinar o raio de cobertura r a partir do fator de proporção β .

3.2.2 Método da Proporção da Área

De forma semelhante à proporção do perímetro (Seção 3.2.1), essa abordagem para o cálculo de área de cobertura é baseada na proporção μ das localidades até uma distância r do transmissor, que possuem um sinal maior ou igual a um dado limiar W_0 . Novamente, para simplificar o desenvolvimento teórico na definição da variável μ , existe a suposição de uma área de cobertura circular de raio r em torno da antena transmissora. A expressão de μ é dada por [1]:

$$\mu = \frac{1}{A} \int_A \text{prob}(W \geq W_0) dA = \frac{2}{r^2} \int_0^r \int_{W_0}^{\infty} p(W) l dW dl \quad (3.21)$$

onde $p(W)$ é a função densidade de probabilidade de potência definida para o ambiente de propagação em questão.

A Equação 3.21 ainda pode ser desenvolvida como:

$$\mu = \frac{2}{r^2} \int_0^r \beta l dl \quad (3.22)$$

onde β é definido pela Equação 3.20.

Pelas Equações 3.21 e 3.22 é possível desenvolver formulações para cada um dos ambientes da Seção 3.1 [31, 39], sendo que essas formulações podem ser obtidas de forma detalhada na literatura.

Da mesma forma que o fator β (Seção 3.2.1), o fator de proporção μ é normalmente definido na fase de especificações de um projeto rádio-móvel. Portanto, a Equação 3.22 é normalmente utilizada na determinação do raio de cobertura r a partir de μ .

3.2.3 Método da Estatística Local

A abordagem por estatística local no cálculo da área de cobertura de uma dada antena considera cada localidade da área como um ambiente a ser modelado de forma isolada. Trabalhos já foram publicados dando subsídios para o desenvolvimento dessa abordagem estatística [27, 30].

A estatística local é baseada na proporção ξ da área de uma dada localidade que está acima de um limiar W_0 , ou seja :

$$\xi = \text{prob}(W_{ij} \geq W_0) = \int_{W_0}^{\infty} p(W_{ij}) dW_{ij} \quad (3.23)$$

onde $W_0 = 10 \log w_0$ e $p(W_{ij})$ é a função densidade de potência que modela a localidade definida pelas coordenadas (i, j) .

Portanto, é possível desenvolver para cada ambiente de propagação, uma fórmula que relaciona ξ com a média local do sinal da localidade, como descrito a seguir [31] :

- Ambiente Lognormal

$$\xi_L = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \text{erf} \left(\frac{W_0 - M_L}{\sqrt{2}\sigma_L} \right) \quad (3.24)$$

- Ambiente Rayleigh

$$\xi_r = \exp \left(-\frac{w_0}{m_r} \right) \quad (3.25)$$

- Ambiente Suzuki

$$\xi_S = \sqrt{\frac{50}{\pi}} \frac{1}{\sigma_L \ln 10} \int_0^{\infty} \frac{1}{t} \exp \left[-\frac{w_0}{m_S} t - \frac{50}{\sigma_L^2} \log^2 t \right] dt \quad (3.26)$$

- Ambiente Rice

$$\xi_R = \exp(-B) \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1 - e_{i-1}(A) \exp(-A)}{i!} B^i \quad (3.27)$$

sendo que

$$B = (1 + A) \frac{w_0}{m_R} \quad (3.28)$$

onde,

$$A = \frac{a^2}{2\sigma_R} \quad (3.29)$$

e

$$e_n(u) = \sum_{m=0}^n \frac{u^m}{m!} \quad (3.30)$$

- Ambiente Nakagami

$$\xi_N = 1 + \frac{1}{\Gamma(m)} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(-1)^{i+1} m^{m+i} \left(\frac{w_0}{m_N}\right)^{M+i}}{i!(m+i)} \quad (3.31)$$

onde $\Gamma(m)$ é dado pela Equação 3.13.

- Ambiente Nakagami Sombreado

$$\xi_{NS} = \frac{m^m}{\Gamma(m)\sqrt{2\pi}} \int_{w_0}^{\infty} \int_0^{\infty} \frac{w^{m-1}}{\bar{w}^{m+1}\sigma_L} \exp\left[-\frac{mw}{\bar{w}} - 50 \left(\frac{\log \bar{w} - \log m_{NS}}{\sigma_L}\right)^2\right] d\bar{w} dw \quad (3.32)$$

Pode-se ainda observar que a Equação 3.23 é igual à Equação 3.20 (proporção do perímetro). Dessa forma, à primeira vista, o processo de predição de cobertura na abordagem da proporção do perímetro parece o mesmo que o da estatística local. A diferença reside no significado dos resultados obtidos para cada uma das abordagens. Após os cálculos da área de cobertura pela estatística local, fica garantido que $(100\xi)\%$ da área de cada localidade possui sinal maior ou igual ao limiar de potencia W_0 imposto. Entretanto, na abordagem da proporção do perímetro, garante-se que $(100\beta)\%$ das localidades a uma distância r da antena transmissora possuem média local maior ou igual ao limiar W_0 .

Um aspecto interessante da estatística local é o fato de ser aplicável com simplicidade para qualquer formato da célula de cobertura, não necessitando de simplificações (células circulares), impostas pelas abordagens anteriores, no desenvolvimento de suas formulações.

3.3 Sumário

No modelamento dos ambientes de propagação de sinais de rádio, diversas distribuições estatísticas foram desenvolvidas para modelar os fenômenos de sombreamento e multipercurso do sinal. Dentre essas distribuições apresentadas, as de Nakagami e Nakagami Sombreado devem ser destacadas, devido a grande flexibilidade e simplicidade apresentadas por suas formulações.

A principal aplicação para os modelos estatísticos de um determinado ambiente é o cálculo da área de cobertura, que consiste em uma importante fonte de informação no planejamento e projeto de um sistema rádio-móvel. Três métodos para o cálculo da área de cobertura foram abordados, todos baseados em fatores de proporção. A principal diferença entre os métodos está na definição conceitual de cada um dos fatores de proporcionalidade associado. Os fatores β e μ são descritos e abordados pela literatura [1, 31, 39], sendo que o fator de proporcionalidade ξ é uma das propostas desta tese.

Capítulo 4

Método Combinado

Uma abordagem comum na descrição do desvanecimento dos sinais de rádio durante a propagação é a sua decomposição em duas partes [18], como a seguir :

$$S(x) = M(x) + R(x) \quad (4.1)$$

onde,

- $S(x)$ é o sinal de desvanecimento¹ em dBm .
- $M(x)$ é o desvanecimento de longo prazo², que consiste na descrição da média local do sinal.
- $R(x)$ é o desvanecimento de curto prazo³, ou desvanecimento de Rayleigh, que consiste nas oscilações que um sinal de rádio pode assumir devido aos efeitos de multipercurso.

A Figura 4.1 ilustra a decomposição do sinal baseada na seguinte consideração sobre a componente $R(x)$:

$$\frac{1}{2L} \int_{x_1-L}^{x_1+L} R(y) dy \rightarrow 0 \quad (4.2)$$

onde x_1 é uma variável de posição e L é uma distância onde se considera $M(x_1)$ razoavelmente constante.

¹Do inglês Fading Signal.

²Do inglês Long Term Fading.

³Do inglês Short Term Fading.

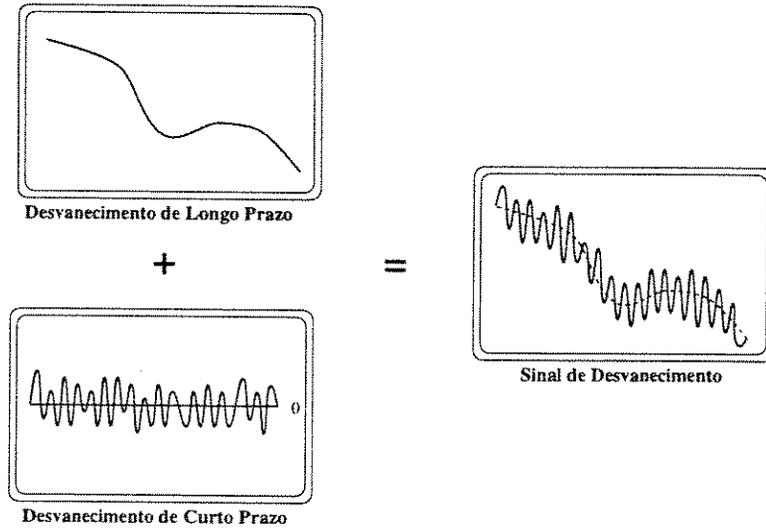


Figura 4.1: *Decomposição do Sinal de Desvanecimento.*

Pela Equação 4.2 observa-se que a idéia do desvanecimento de curto prazo está associada a um sinal de potência, com média zero, dentro de uma determinada janela espacial de tamanho $2L$. Portanto, a média local do sinal pode ser extraída através de médias das sucessivas janelas espaciais com tamanho $2L$. Para uma decomposição precisa existe ainda a necessidade da escolha de um valor para L apropriado. A análise de medidas experimentais sugerem um L de 20λ [18, 37], onde λ é o comprimento de onda do sinal.

O grande mérito dessa abordagem por decomposição é facilitar o isolamento dos efeitos sofridos pelo sinal. As perdas de percurso devido às diversas morfologias, e os efeitos de sombreamento decorrentes da topografia do terreno afetam apenas o desvanecimento de longo prazo. Já os efeitos de mutipercursos afetam apenas o desvanecimento de curto prazo do sinal.

Dessa forma, fica claro que para uma descrição completa do sinal de rádio se propagando, as duas componentes do sinal, $M(x)$ e $R(x)$ podem ser modeladas de forma isolada, separando alguns dos efeitos do desvanecimento. Portanto, com base nas descrições dos métodos de previsão dos Capítulos 2 e 3, é presumível a proposição de um método combinado que utilize as metodologias empíricas para o cálculo da média local do sinal, e os métodos estatísticos de cobertura para verificar as influências sobre os desvanecimentos de longo prazo e curto prazo do sinal.

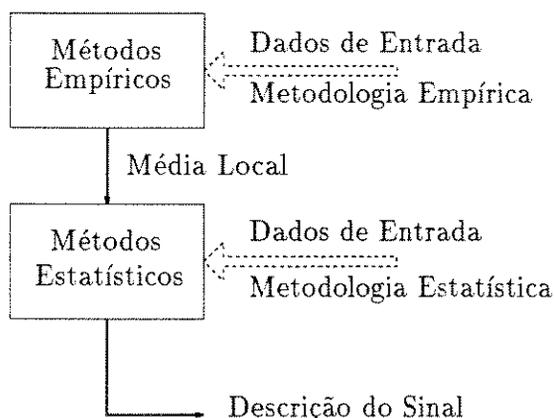


Figura 4.2: Fluxograma Geral do Método Combinado.

4.1 Descrição Geral

A metodologia combinada proposta pode ser descrita de forma sucinta pelo fluxograma da Figura 4.2.

Em uma primeira etapa do método combinado, uma metodologia empírica é empregada no cálculo da média local do sinal em uma determinada localidade, sendo que o acoplamento com o método estatístico é feito através da referida média local.

Em seguida, um método estatístico avalia os efeitos do desvanecimento de longo prazo e de curto prazo do sinal, permitindo assim, uma análise completa do sinal se propagando.

A dificuldade para combinar os métodos empíricos com os estatísticos reside principalmente na fase de acoplamento entre os métodos, através da média local, de tal forma a permitir uma boa implementação computacional. Algumas restrições foram impostas para que essa combinação se concretizasse, como será descrito nas seções posteriores deste capítulo.

4.2 Cálculo da Média Local

Como já mencionado anteriormente, o cálculo da média local dentro do método combinado fica a cargo de uma metodologia empírica. A principal restrição feita nessa etapa do método combinado é a utilização de métodos ponto a ponto, ou adaptações de outras metodologias para esse caso. As metodologias

ponto a ponto apresentam vantagens sobre os métodos de predição por área no cálculo da média local do sinal [18]. Essas vantagens podem ser sintetizadas nos resultados mais precisos que são obtidos (Seção 2.2.4). Outro aspecto vantajoso na utilização dos métodos ponto a ponto é na fase de implementação computacional pois apresenta uma menor quantidade de decisões subjetivas⁴, além de permitir a modelagem de sinais se propagando por múltiplas morfologias.

4.3 Modelo para o Desvanecimento de Longo Prazo e Curto Prazo

Os modelos estatísticos para ambientes de propagação abordados no Capítulo 3, Seção 3.1, verificam a influência do desvanecimento de longo prazo e de curto prazo no nível do sinal se propagando. As metodologias estatísticas para o cálculo da área de cobertura se utilizam desses modelos, na execução de seus algoritmos, através da definição dos fatores de proporção β , μ e ξ descritos na Seção 3.2, Capítulo 3.

Na aplicação dessas metodologias dentro do método combinado, a principal restrição feita é a necessidade de se utilizar o método da estatística local, ou seja, o fator de proporção ξ (Seção 3.2.3). O método da estatística local é o único que apresenta características para um bom acoplamento com os métodos empíricos ponto a ponto. As outras abordagens apresentam algumas dificuldades no tratamento dos dados, pois necessitam de uma consideração prévia quanto ao formato da célula.

Portanto, em decorrência da restrição imposta no cálculo da média local, o espaço de metodologias estatísticas aplicáveis fica limitado ao método da estatística local.

Quanto ao modelo estatístico utilizado para descrever as características dos ambiente de propagação, o método combinado implementa o modelo Nakagami Sombreado. Isso é feito em decorrência da desejável característica

⁴O conceito de decisão subjetiva está associado ao uso de variáveis nebulosas para a modelagem de determinadas características do ambiente de propagação. Esse tipo de variável possui faixas de decisão que se sobrepõem, ou seja, regiões onde é exigida uma interferência humana para uma decisão coerente, ou ainda de eficientes critérios de decisão automáticos.

dessa distribuição de gerar todas as outras distribuições estatísticas⁵ abordadas no Capítulo 3. Outro aspecto da distribuição Nakagami Sombreado é o fato de descrever os efeitos combinados de sombreamento e multipercurso, e portanto, consiste em um modelo para o desvanecimento de longo prazo e de curto prazo do sinal. O desvanecimento de curto prazo do sinal é modelado pela distribuição de Nakagami associada à distribuição Nakagami Sombreado. Já o desvanecimento de longo prazo é modelado pela distribuição Lognormal associada. O trabalho desenvolvido por Marsan e Hess [30] demonstra a possibilidade de se modelar o efeito de sombreamento através de uma distribuição Lognormal em uma determinada localidade. Nessa situação, o valor do desvio padrão σ_L aumenta com o aumento da área da localidade. Valores de σ_L para pequenas áreas atingem até 5,5 decibéis em algumas situações, o que mostra a necessidade de medidas experimentais para uma avaliação precisa do valor de σ_L .

4.4 Sumário

Para uma descrição completa do desvanecimento dos sinais de rádio durante a sua propagação, existe a necessidade de modelar as características das duas componentes básicas do referido sinal, o desvanecimento de longo prazo e o desvanecimento de curto prazo.

O método combinado proposto calcula a média local do sinal com uso das metodologias empíricas ponto a ponto, sendo que as componentes de longo prazo e de curto prazo do sinal são modeladas através do método da estatística local, com a distribuição de Nakagami Sombreado. O acoplamento entre a metodologia empírica e a estatística utilizadas é feito através da própria média local calculada. As restrições impostas ao método combinado decorrem das vantagens apresentadas pelas metodologias ponto a ponto, tanto em relação à precisão dos resultados, como pela maior facilidade de aplicação computacional.

⁵Essa característica da distribuição Nakagami Sombreado é abordada em detalhes pelo Apêndice B.

Capítulo 5

Implementação da Plataforma de Predição de Cobertura

O problema da implementação da plataforma para a predição de cobertura celular passa por uma série de definições prévias. De início, especificações de âmbito bastante genérico devem ser definidas para montar um quadro da estrutura geral do *software*, e estipular com que ferramentas essa estrutura será implementada.

Com referência à estrutura geral, um requisito de especificação estabelece a implementação do método combinado descrito pelo Capítulo 4, tal que possua uma estrutura modular para possibilitar a combinação de diferentes blocos funcionais. O propósito de especificar essa estrutura modular é obter, com a combinação dos blocos funcionais, flexibilidade para uma escolha entre as diversas metodologias de cálculo de área de cobertura da literatura, descritas nos Capítulos 2 e 3.

Quanto à definição das ferramentas para implementação, deve-se escolher uma linguagem de programação que possua os recursos demandados pelo projeto. Na concepção da estrutura modular especificada, é desejável o uso de técnicas de Programação Orientada a Objeto (POO) por permitir um alto grau de abstração, facilitando a implementação. A linguagem C++ [40] foi escolhida não só por atender todas as necessidades, mas por conta de sua portabilidade para diversas plataformas. Outras ferramentas como compiladores, sistema operacional e plataforma de desenvolvimento foram definidas. Por uma questão de facilidade de obtenção de recursos, escolheu-se o compilador C++ da Borland[®] [41], versão 3.1, o sistema operacional DOS da Microsoft[®] e um PC/AT386.

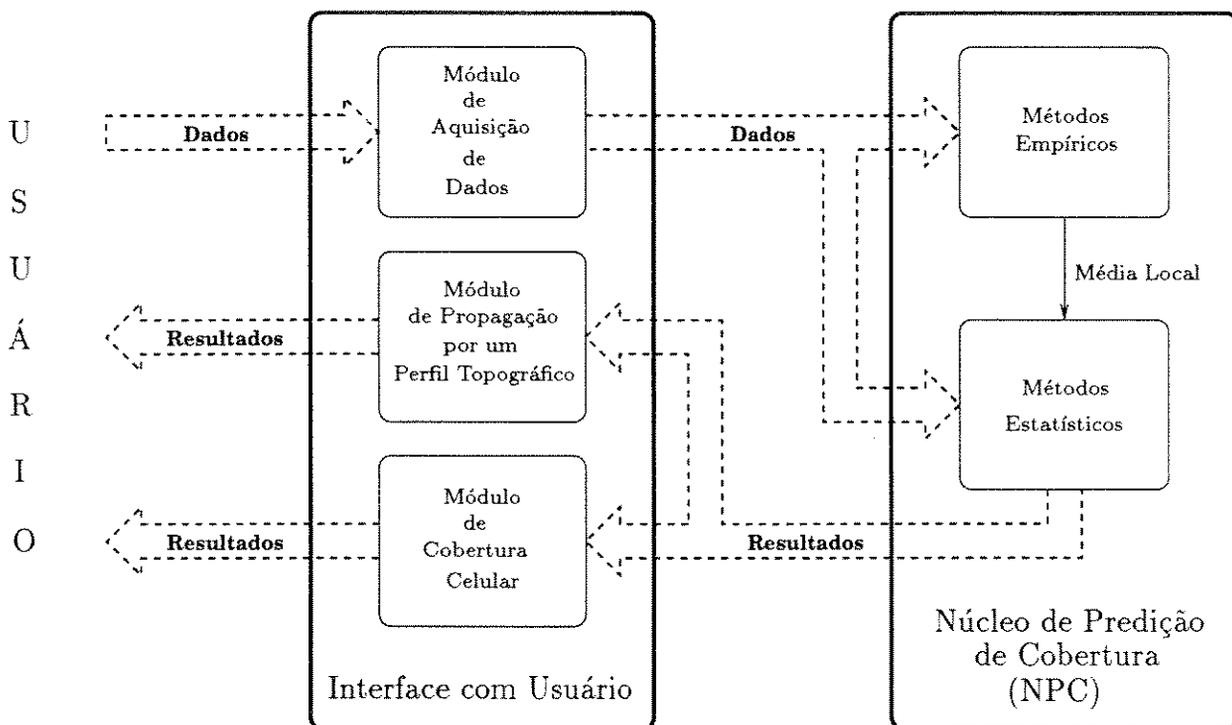


Figura 5.1: Estrutura Geral do Software de Predição de cobertura.

A partir da estrutura geral e da definição das ferramentas de implementação, deve-se partir para um maior detalhamento do projeto. As seções posteriores desse capítulo tratarão desse detalhamento.

5.1 Estrutura Geral

Uma boa implementação de um *software* com um enfoque orientado a objeto pressupõe uma análise funcional prévia das características desejadas. Após essa análise, as características são incorporadas às diversas entidades¹ concebidas, que posteriormente são abstraídas para objetos com a criação de interfaces com o meio externo.

Especificamente nesse caso, o projeto foi dividido, antes da mencionada análise funcional, em dois grandes módulos : uma *Interface com o Usuário* e

¹No contexto, entidade deve ser entendida como algo que incorpora a essência do objeto, ou seja, engloba as características mais importantes desse objeto.

um *Núcleo de Predição de Cobertura* (Figura 5.1). Internamente a cada um desses módulos é que se faz a referida análise das entidades a serem criadas. Entretanto, essa divisão do projeto foi feita com o intuito de isolar algumas tarefas. A *Interface com Usuário* contém todas as funções relativas a prover uma boa operacionalidade. Já o Núcleo de Predição de Cobertura (NPC) incorpora as funções relativas à predição de cobertura, ou seja, contém a implementação de todos os métodos e modelos, empíricos ou estatísticos.

É interessante observar que com essa concepção da estrutura geral, o NPC fica isolado do usuário através de interfaces. Dessa forma o NPC tem portabilidade total para qualquer plataforma, pois qualquer incompatibilidade fica retida na *Interface com o Usuário*.

5.2 Interface com o Usuário

Descrições extensivas sobre a *Interface com o Usuário* são absolutamente desnecessárias, dados os propósitos desse trabalho. Uma boa avaliação da sua qualidade pode ser feita através da verificação dos resultados obtidos na qualidade visual e operacionalidade.

A interface com usuário desenvolvida para a plataforma PC/AT386-DOS possui três módulos como mostrado na Figura 5.1, com as seguintes descrições funcionais :

- O *Módulo para Aquisição de Dados* tem a função de obter dados do usuário e organizar as informações relevantes, para posteriormente enviá-las para o NPC.
- O *Módulo de Propagação por um Perfil Topográfico* é um ambiente para a apresentação na tela de vídeo dos resultados obtidos de cálculos feitos pelo NPC com relação a propagação de um sinal por esse perfil topográfico (Figura 5.2).
- O *Módulo de Cobertura Celular* é um ambiente para apresentação dos resultados obtidos na predição da área de cobertura de uma determinada estação rádio base. Os cálculos da referida predição são feitos pelo NPC, e apresentados na tela de vídeo, através da forma da célula para as especificações definidas e para um dado limiar de potência (Figura 5.3).

Portanto, a *Interface com o Usuário* desenvolvida é composta por três módulos que podem ser divididos de acordo com a suas funções. O Módulo

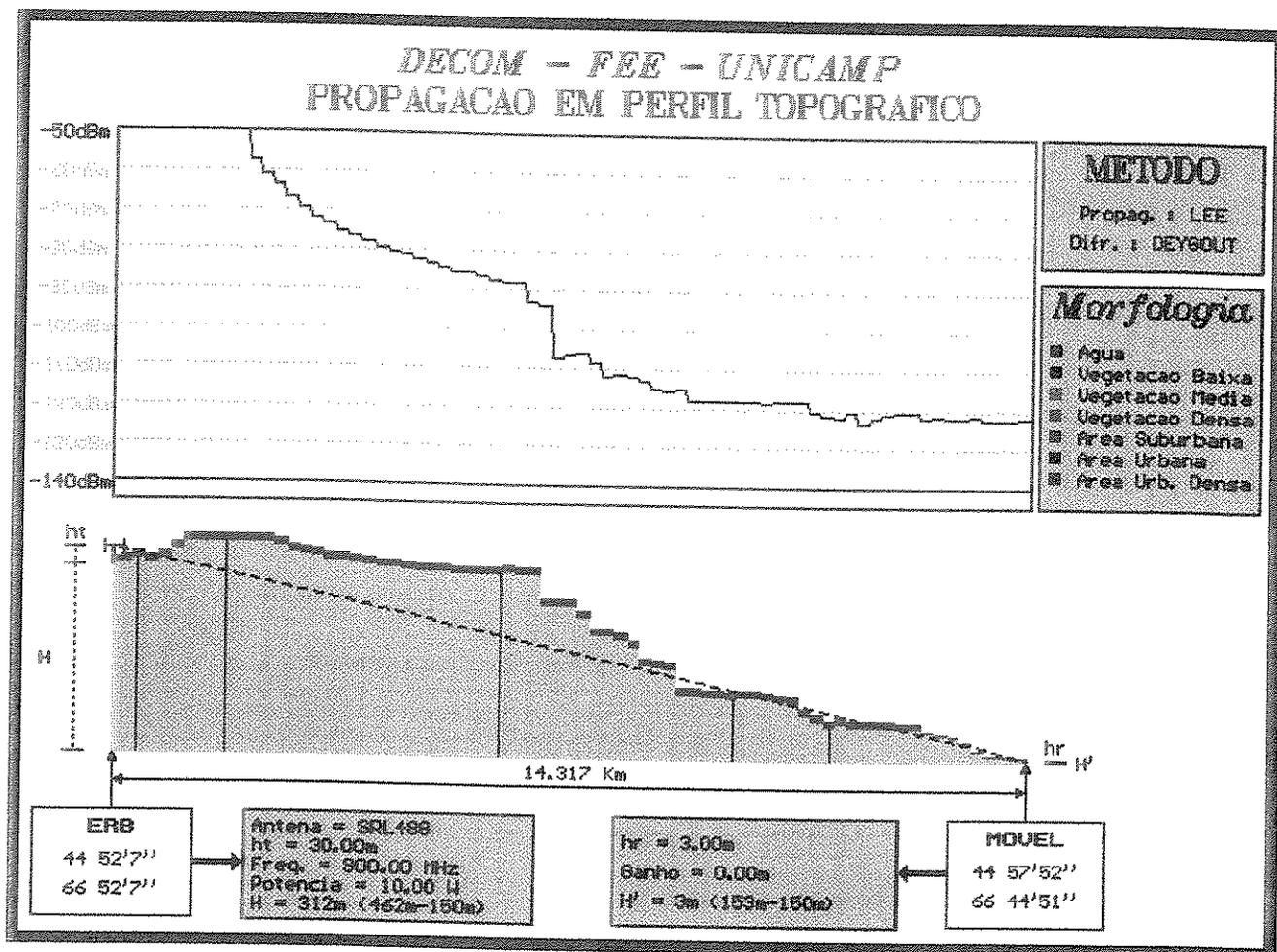


Figura 5.2: Módulo de Propagação por um Perfil Topográfico.

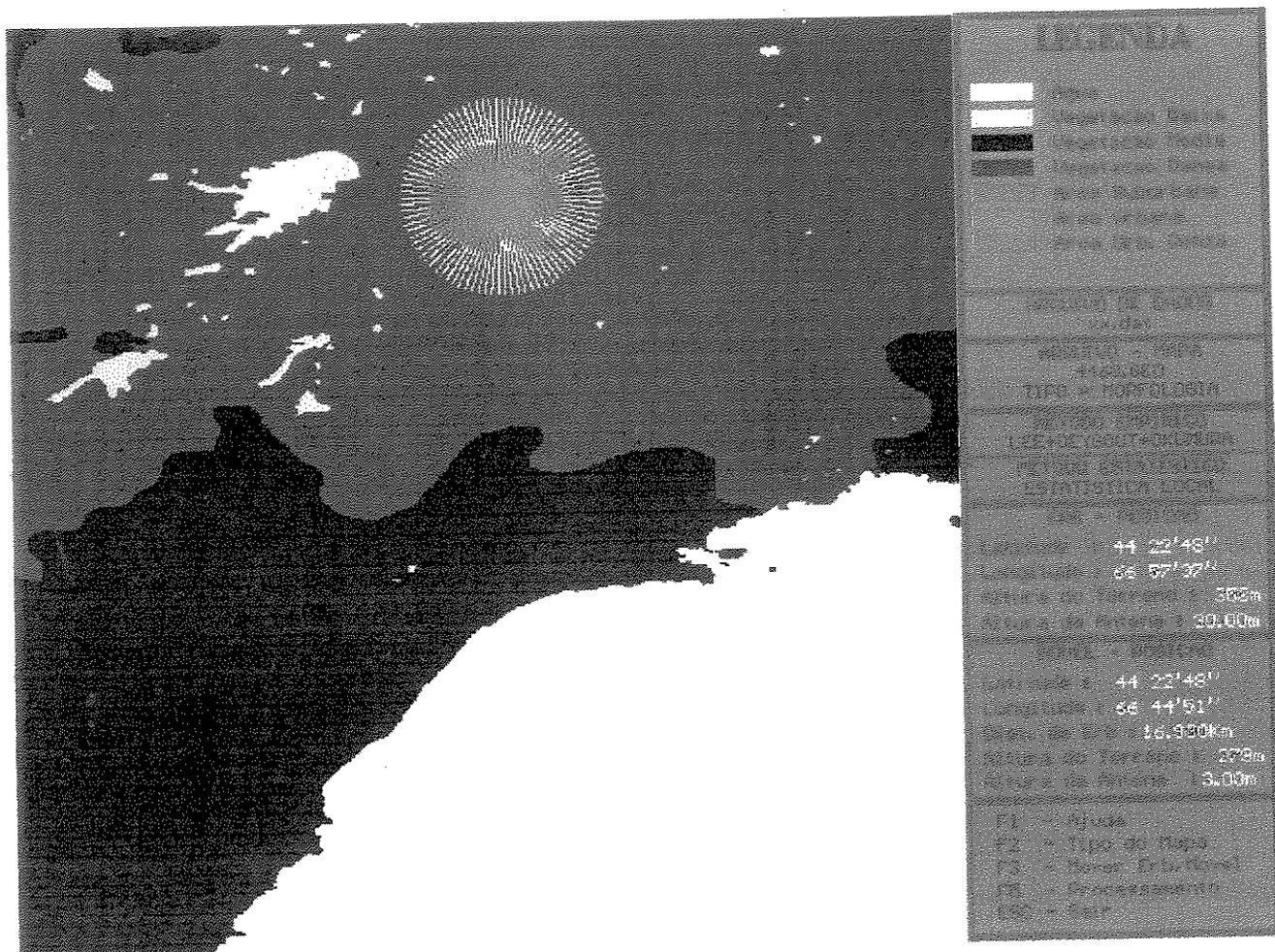


Figura 5.3: Módulo de Cobertura Celular.

de Aquisição de Dados pode ser classificado como um módulo de entrada de dados pelo usuário, enquanto que os outros dois, como módulos de saída de dados para o usuário.

5.3 Núcleo de Predição de Cobertura (NPC)

Incorporando todas as rotinas de cálculo dos métodos e modelos de predição de cobertura, o *Núcleo de Predição de Cobertura* se constitui na principal etapa do desenvolvimento do projeto.

Como especificado na estrutura geral da plataforma de predição de cobertura, o NPC foi implementado com uma estrutura modular através de técnicas de Programação Orientada a Objeto com o uso da linguagem C++. Na linguagem de programação C++, os objetos criados são chamados de classes, as quais descrevem as características de uma dada entidade, sendo que a partir dessas classes básicas, existe ainda a possibilidade de derivar outras classes [40]. Por exemplo, pode-se criar uma classe básica que descreva a entidade *modelo de difração* e, em seguida, criar classes derivadas de nome Bullington, Deygout e Giovanelli, que são modelos de difração. Uma classe básica incorpora as funções comuns a todos os membros derivados, ou seja, descreve as características básicas que definem a entidade. Já as classes derivadas possuem a descrição das funções para cada caso específico. A Figura 5.4 mostra as principais derivações de classes feitas no desenvolvimento do NPC.

A grande vantagem em se montar uma estrutura orientado a objeto é a facilidade de manipulação desses objetos, ou classes, pela grande abstração alcançada. Durante a concepção do projeto, os motivos para a montagem de uma estrutura modular vieram da observação das características das diversas metodologias empíricas descritas no Capítulo 2. Uma análise permite concluir que todos os métodos empíricos ponto a ponto, ou adaptações para esse caso, podem ser generalizados dentro de um algoritmo básico. A Figura 5.5 mostra esse algoritmo em que todas as metodologias propostas podem ser generalizadas para uma composição somatória de três efeitos, relacionados às três categorias de modelos empíricos : modelos de propagação, difração e reflexão. Dessa forma, o NPC foi construído com a idéia de que na sua operação é possível escolher qualquer modelo de propagação, difração ou reflexão, ou seja, é possível combinar quaisquer modelos e portanto, os seus efeitos associados, e avaliar as conseqüências dessa combinação. Por exemplo, a formulação de Hata só leva em consideração as perdas devido a propagação do sinal. Pode-se, então, fazer

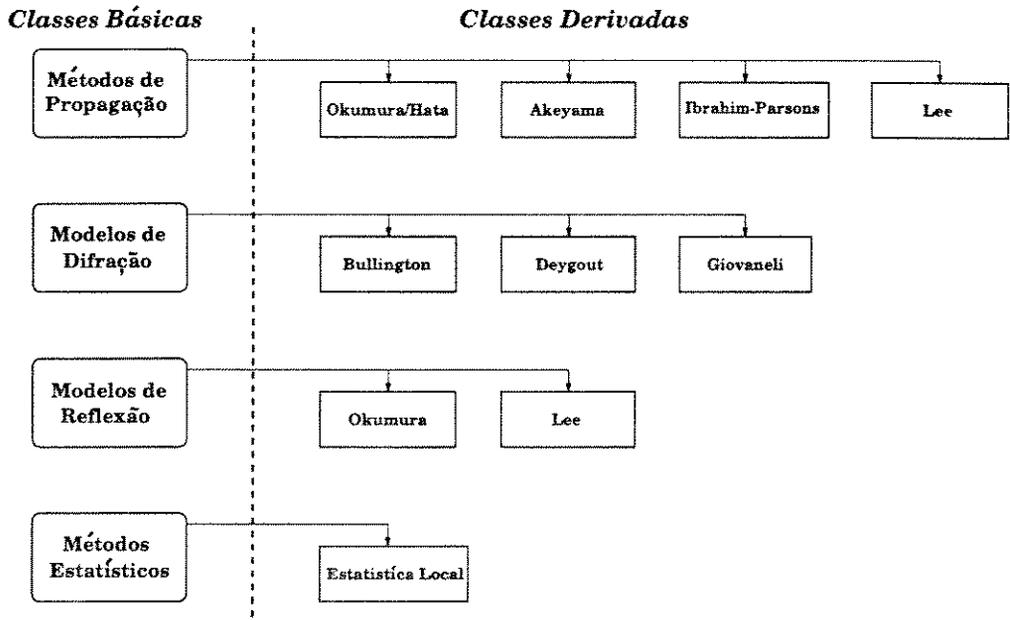


Figura 5.4: Hierarquia de classes no NPC.

uma combinação com qualquer dos modelos de difração implementados e obter métodos como Hata/Bullington, Hata/Deygout ou Hata/Giovaneli. Posteriormente, se for necessária a consideração dos efeitos da altura efetiva da antena transmissora, pode-se ainda compor o método Hata/Deygout, com o modelo de reflexão proposto por Okumura, gerando o método Hata/Deygout/Okumura.

Portanto, o propósito da definição de uma estrutura modular para o NPC é a obtenção da desejável característica de combinação dos diversos métodos e modelos para obter a flexibilidade descrita. A Figura 5.6 mostra a estrutura orientada a objeto do NPC, ilustrando ainda, o mencionado processo de combinação. Observa-se na Figura 5.6 que esse tipo de estrutura também foi implementada para os métodos estatísticos. Da mesma forma, os métodos estatísticos podem ser escolhidos através de configuração, apesar de que apenas o método da estatística local ter sido implementado e portanto, a escolha se resume em se utilizar esse método ou não. Quanto aos outros métodos estatísticos a decisão de não implementá-los é baseada nos motivos descritos pela Seção 4.3 do Capítulo 4.

O último aspecto a ser abordado dentro da implementação do NPC são os algoritmos utilizados para a implementação de cada uma das classes. Os

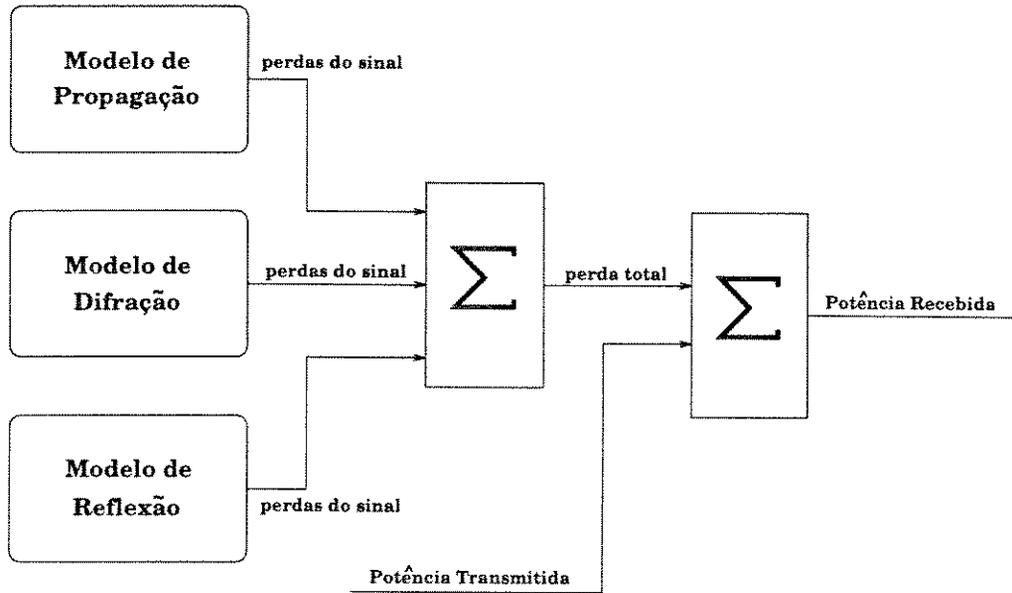


Figura 5.5: Algoritmo Básico das Metodologias Empíricas.

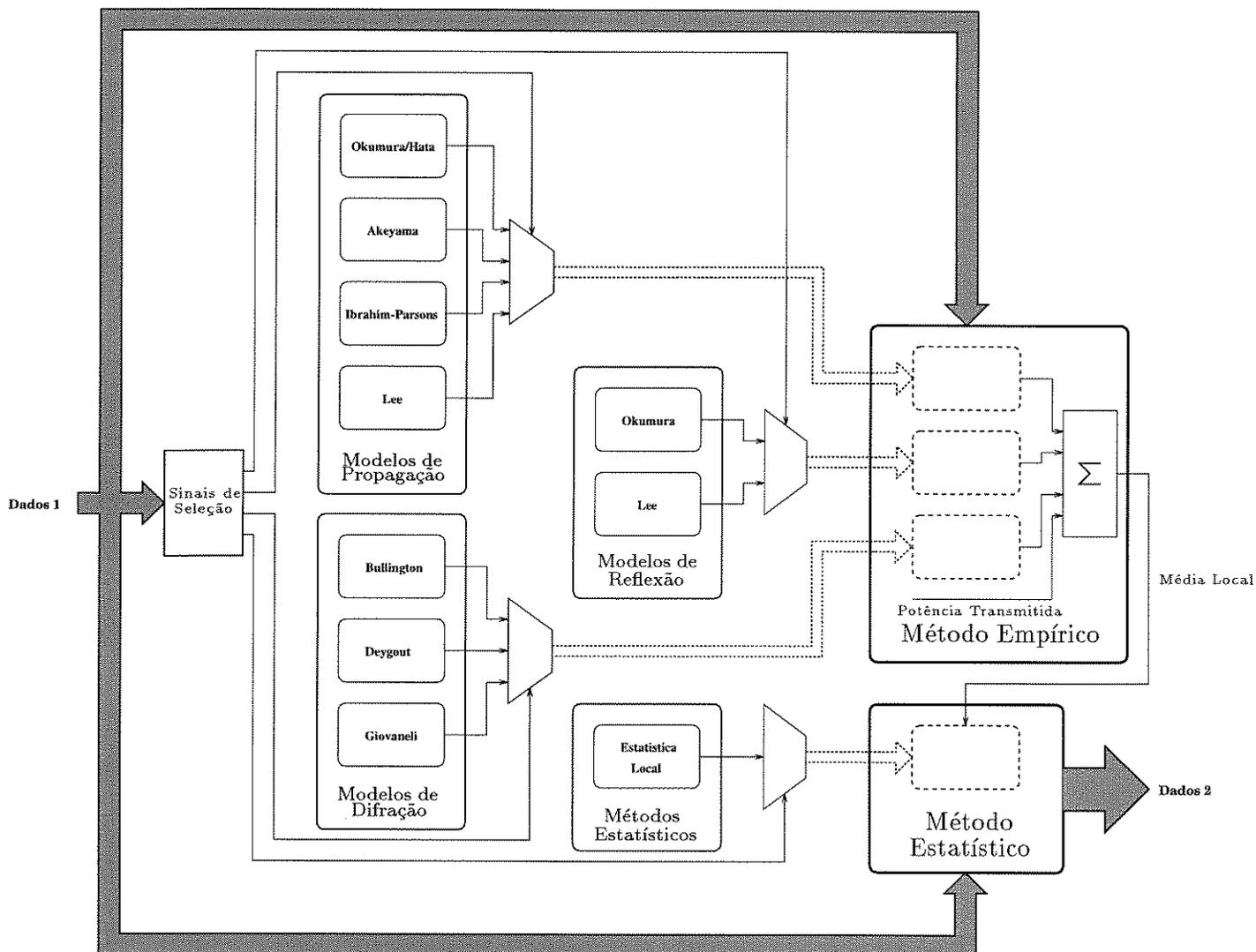
fluxogramas descrevem procedimentos independentes da linguagem de programação, contribuindo dessa forma, para um melhor entendimento dos modelos e métodos implementados.

5.3.1 Algoritmos dos Modelos de Propagação

Os modelos de propagação implementados foram descritos no Capítulo 2, Seção 2.2. Portanto, com base nessas descrições foram montados os algoritmos em forma de fluxograma dos seguintes modelos :

- Okumura/Hata
- Akeyama
- Lee
- Ibrahim-Parsons

A implementação do modelo de propagação proposto por Okumura é comumente feita através da formulação de Hata. Como já abordado na Seção 2.2.2, para a formulação de Hata originalmente proposta foi desenvolvida uma série



Legenda

-  Multiplexador.
-  Somador.
-  Espaço para alocação de um Método ou um Modelo.
-  Indica que um método ou um modelo já foi selecionado e está sendo transferido.
-  Barramento com dados.

Dados 1 : Dados provenientes do Módulo de Aquisição de Dados.

Dados 2 : Resultados para o Módulo de Propagação por um Perfil Topográfico ou Módulo de Cobertura Celular.

Figura 5.6: Núcleo de Predição de Cobertura (NPC).

de extensões com o intuito de expandir as faixas de aplicação dos parâmetros de entrada. Na Figura 5.7 é apresentado o fluxograma para a implementação do referido modelo de Okumura/Hata, no qual todas as extensões descritas são consideradas.

Em seguida, na Figura 5.8, é apresentado o fluxograma para a implementação da modificação de Akeyama. Nesse caso, a formulação de Hata é utilizada para determinar as perdas de propagação em uma área urbana padrão do modelo de Okumura original, adicionando-se a essa perda básica o fator de excesso proposto por Akeyama.

O fluxograma do modelo de propagação de Lee é mostrado na Figura 5.9. Nesse modelo são consideradas as perdas de propagação por múltiplas morfologias através das retas de perdas definidas cada uma por um par $[\gamma, W_0]$, onde γ é o coeficiente angular da reta e W_0 é a potência do sinal a uma milha de distância da estação base.

O último modelo de propagação implementado foi o de Ibrahim-Parsons, o qual tem boa aplicabilidade apenas para regiões urbanas, sendo que o seu algoritmo para a implementação é apresentado no fluxograma da Figura 5.10.

Uma característica comum a todos os fluxogramas apresentados diz respeito aos parâmetros de entrada e de saída. Todas as funções retornam a sua chamada o valor da potência do sinal na recepção, e dessa forma, a potência transmitida já é computada nos cálculos. Os dados de entrada necessários para os cálculos são os dados das antenas envolvidas e as características do perfil morfológico do terreno.

5.3.2 Algoritmos dos Modelos de Difração

Os algoritmos dos modelos de difração para múltiplas obstruções tentam em geral reduzir o problema para o caso de uma obstrução. Assim, convenientemente foi criada uma função que calcula as perdas por difração devido à uma obstrução. Essa função faz parte da classe básica de modelos de difração e dessa forma é herdada por todas as classes derivadas [40]. A Figura 5.11

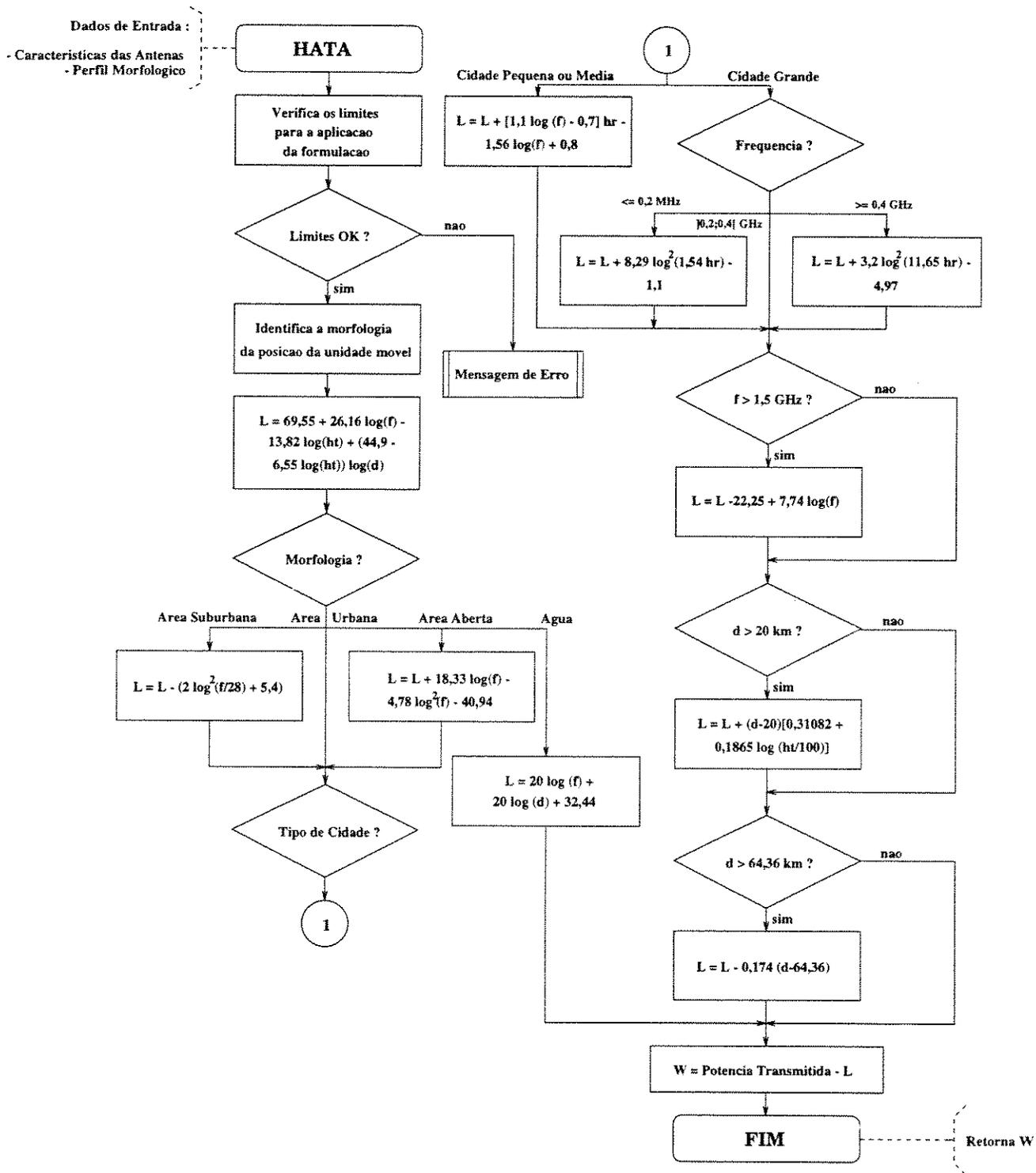


Figura 5.7: Fluxograma - Formulação de Hata.

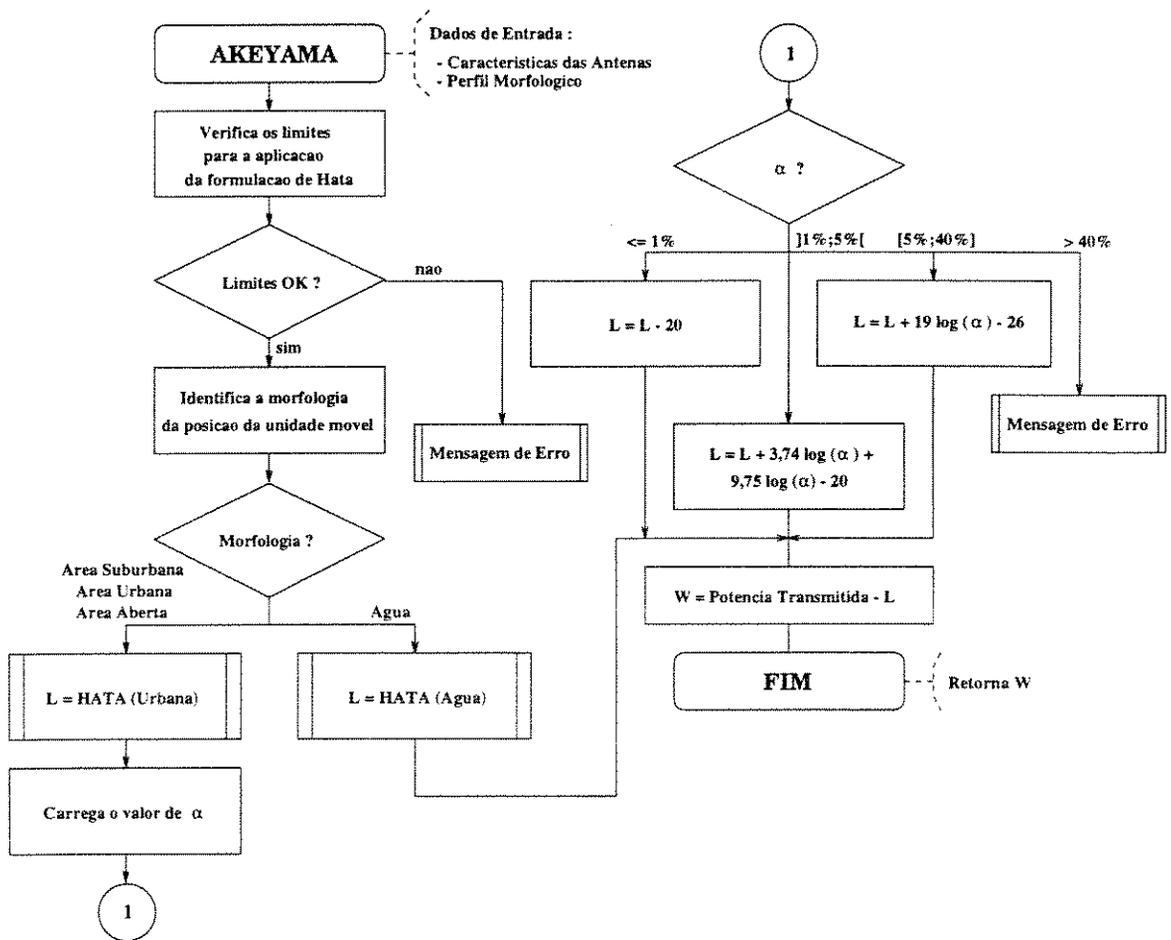


Figura 5.8: Fluxograma - Modificação de Akeyama.

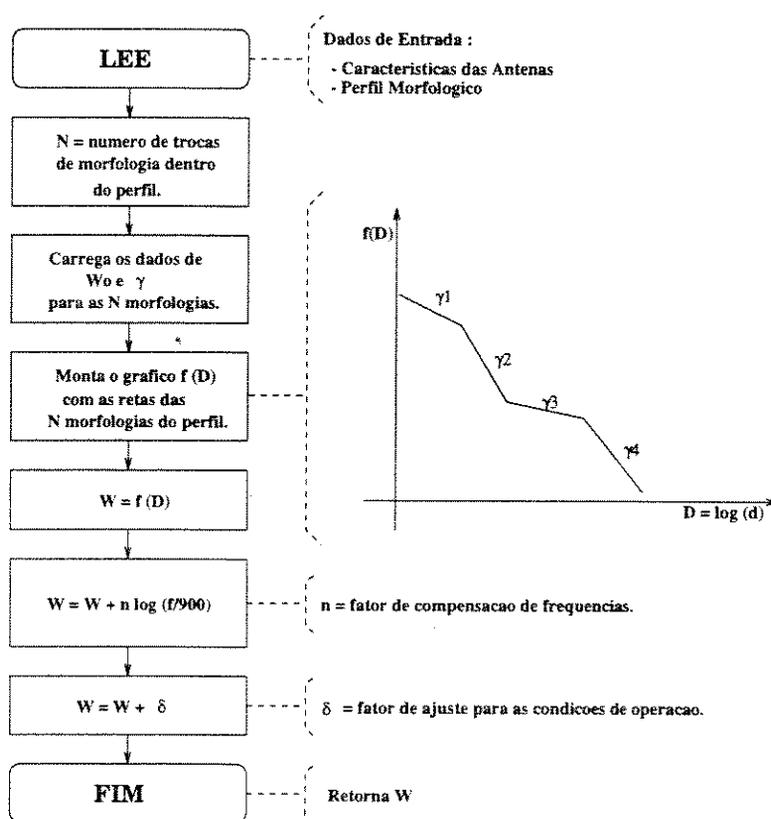


Figura 5.9: Fluxograma - Modelo de Lee (Propagação).

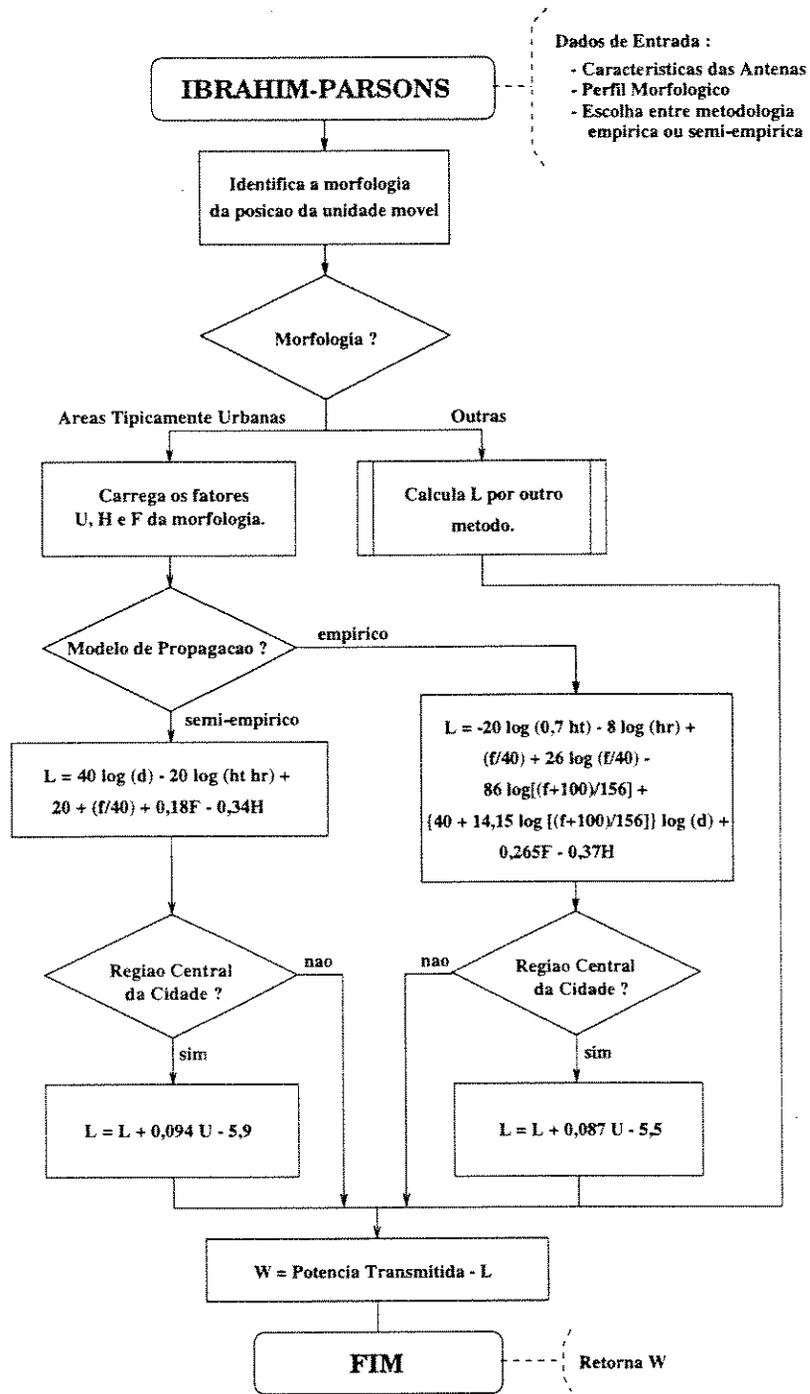


Figura 5.10: Fluxograma - Modelo de Ibrahim-Parsons.

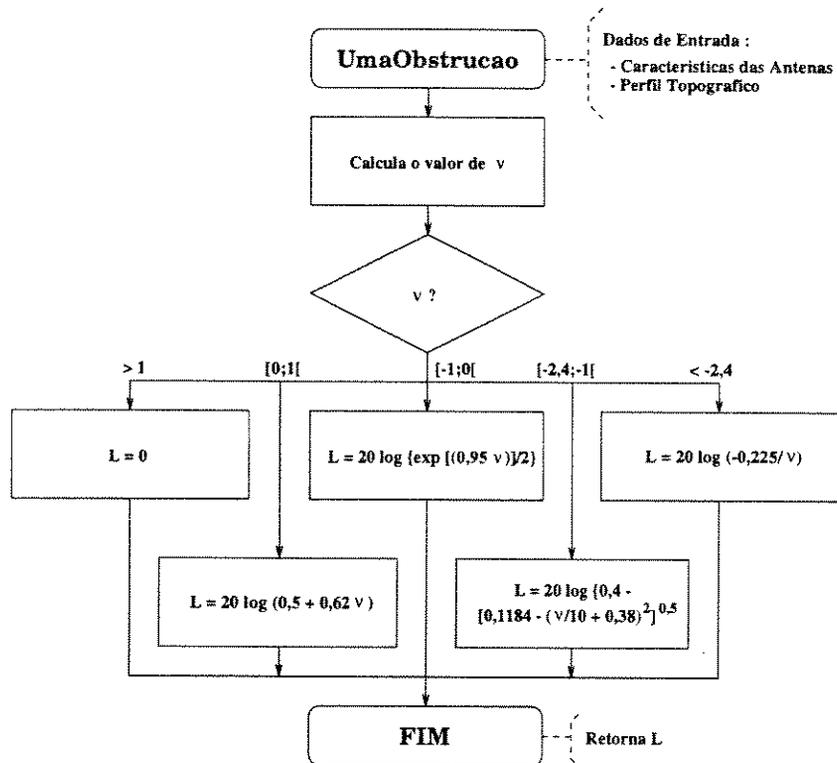


Figura 5.11: Fluxograma - Perdas por Difração de uma Obstrução.

apresenta o fluxograma da implementação dessa função (Equação 2.1.3).

Em seguida foram implementados os seguintes modelos para o cálculo da difração por múltiplas obstruções :

- Modelo de Bullington - (Figura 5.12)
- Modelo de Deygout - (Figura 5.13)
- Modelo de Giovanelli - (Figura 5.14)

Detalhes sobre cada um desses modelos implementados podem ser obtidos na Seção 2.3 do Capítulo 2. Todas as funções implementadas retornam à sua chamada a perda total em decibéis devido às obstruções no perfil topográfico, e utilizam para tanto os dados relativos às antenas transmissora e receptora e informações retiradas a partir do perfil topográfico.

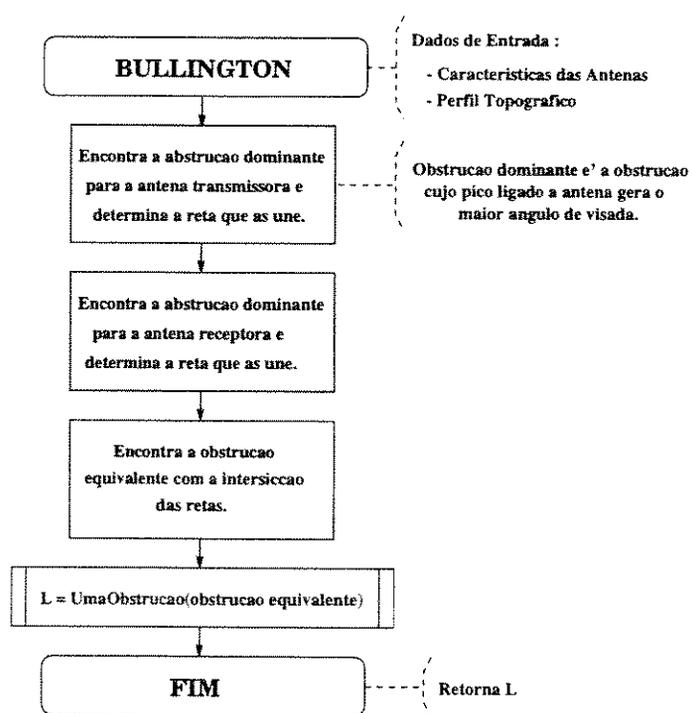


Figura 5.12: Fluxograma - Modelo de Bullington.

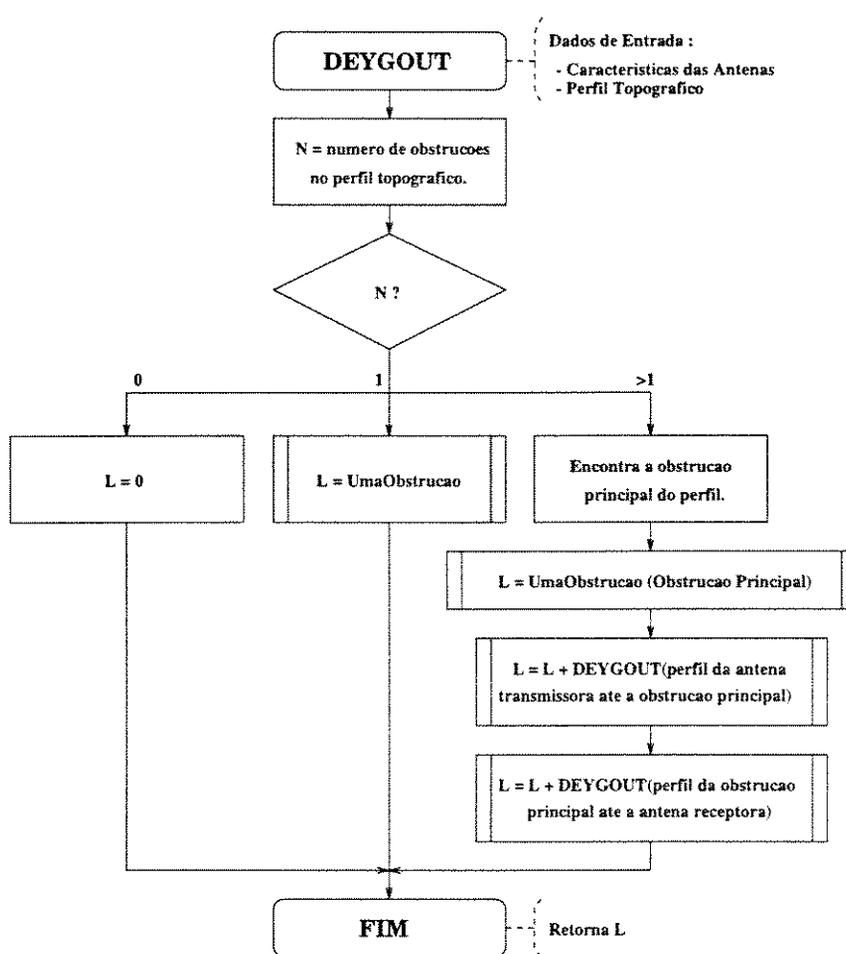


Figura 5.13: Fluxograma - Modelo de Deygout.

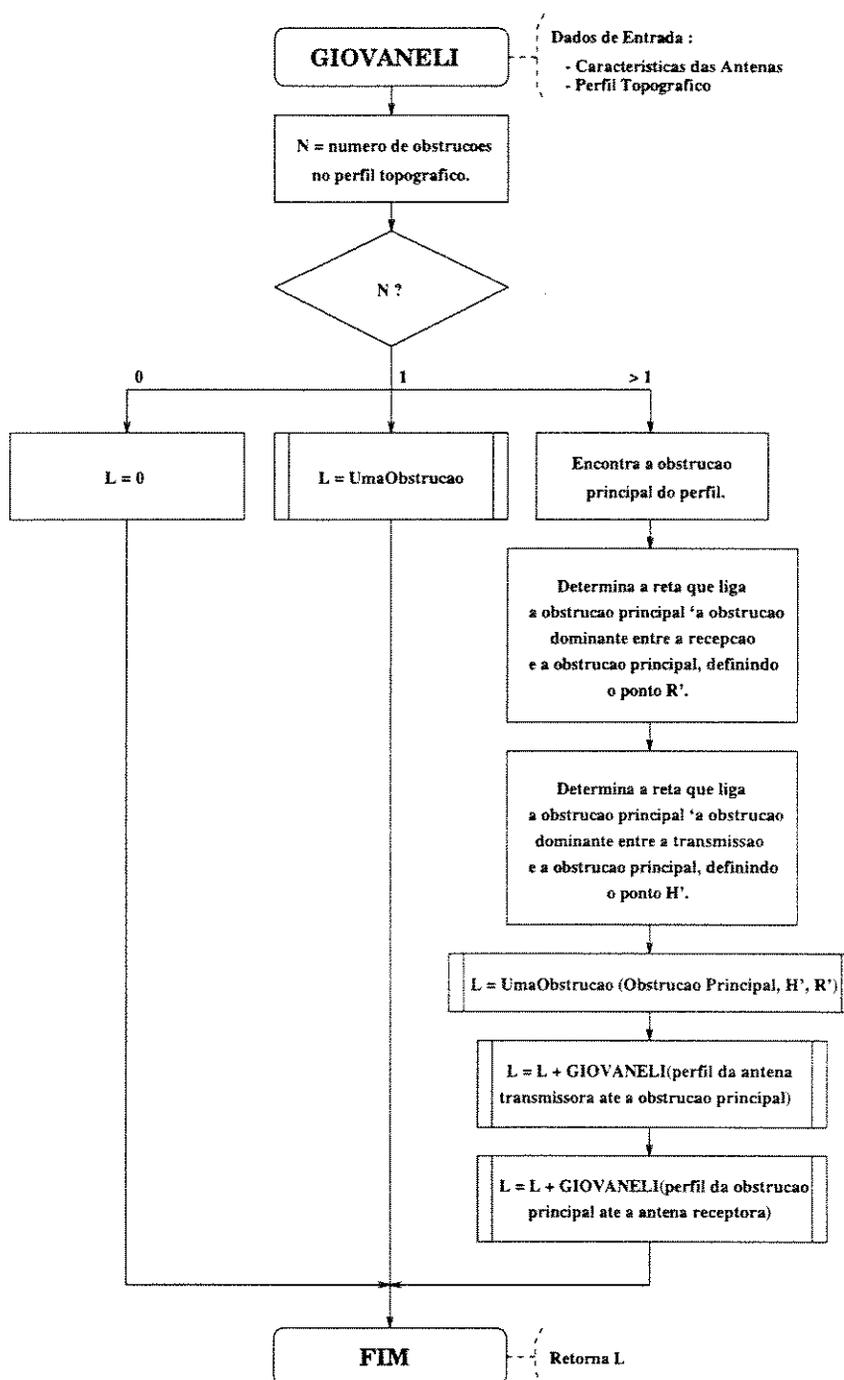


Figura 5.14: Fluxograma - Modelo de Giovaneli.

5.3.3 Algoritmos dos Modelos de Reflexão

Os modelos de reflexão procuram avaliar os efeitos de uma onda refletida na antena receptora através de um fator calculado a partir da altura efetiva da antena transmissora. Na Seção 2.4 do Capítulo 2, são descritos dois modelos :

- Modelo de Okumura - (Figura 5.15)
- Modelo de Lee - (Figura 5.16)

Os dois modelos citados foram implementados, sendo que ambos retornam à sua chamada a perda ou ganho devido a altura efetiva da antena transmissora. Os dados de entrada necessários nesses cálculos são os dados das antenas e informações do perfil topográfico.

5.3.4 Algoritmo do Método Estatístico

O único método estatístico implementado nesse projeto foi o método da estatística local descrito na Seção 3.2.3 do Capítulo 3, pelos motivos descritos na Seção 4.3. A partir do valor da média local calculada pelas metodologias empíricas, do modelo estatístico do ambiente de propagação, e da proporção ξ , calcula-se uma correção para a referida média local. O fluxograma da Figura 5.17 apresenta o algoritmo para a implementação desse método, o qual é baseado na resolução da seguinte equação :

$$\begin{aligned} \xi &= \int_{w_0}^{\infty} p_{NS}(W_{ij}) dW_{ij} \\ &= \frac{m^m}{\Gamma(m)\sqrt{2\pi}} \int_{w_0}^{\infty} \int_0^{\infty} \frac{w^{m-1}}{\bar{w}^{m+1}\sigma_L} \exp\left[-\frac{mw}{\bar{w}} - 50\left(\frac{\log \bar{w} - \log m_{NS}}{\sigma_L}\right)^2\right] d\bar{w} dw \end{aligned} \quad (5.1)$$

Para resolver a Equação 5.1, foram implementados métodos numéricos para desenvolver a integral dupla e a função $\Gamma(m)$. Para solucionar as integrais utilizou-se a regra de Simpson [42], sendo que a função $\Gamma(m)$ é desenvolvida a partir da seguinte expansão em série [43] :

$$\Gamma(m) \cong m^m e^{-m} \sqrt{\frac{2\pi}{m}} \left[1 + \frac{1}{12m} + \frac{1}{288m^2} - \frac{139}{51849m^2} - \frac{571}{2488320m^4} \right] \quad (5.2)$$

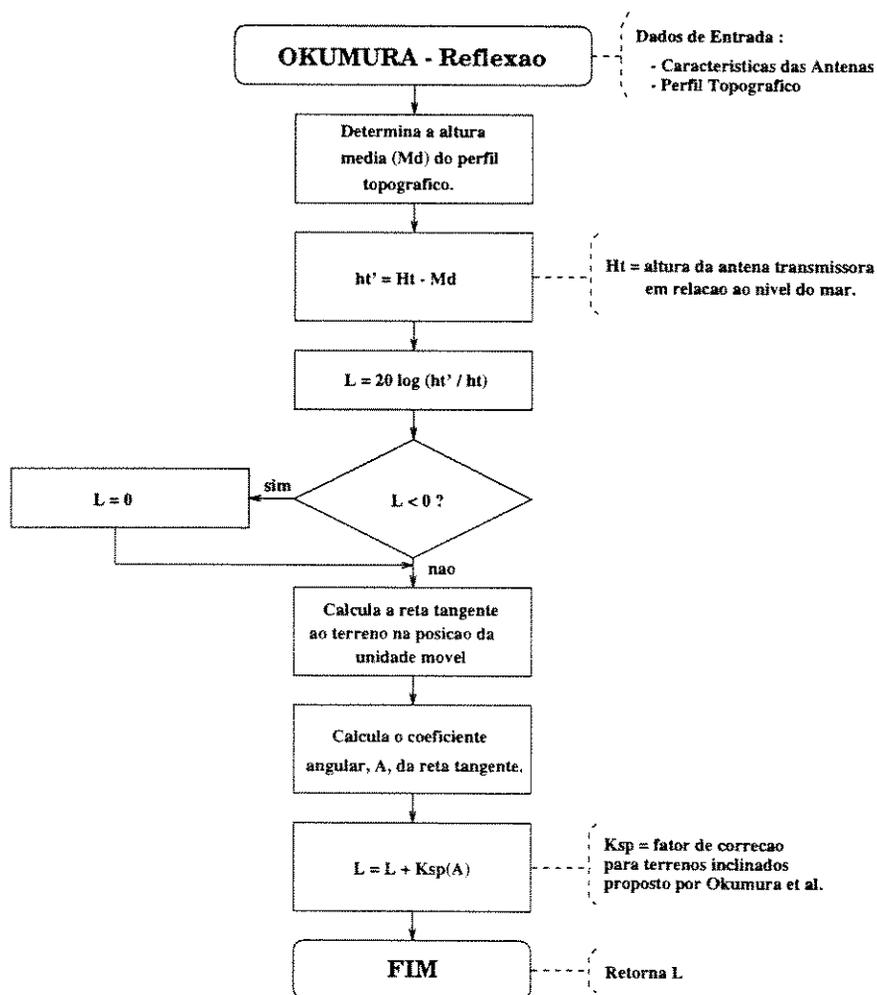


Figura 5.15: Fluxograma - Modelo de Okumura (Reflexão).

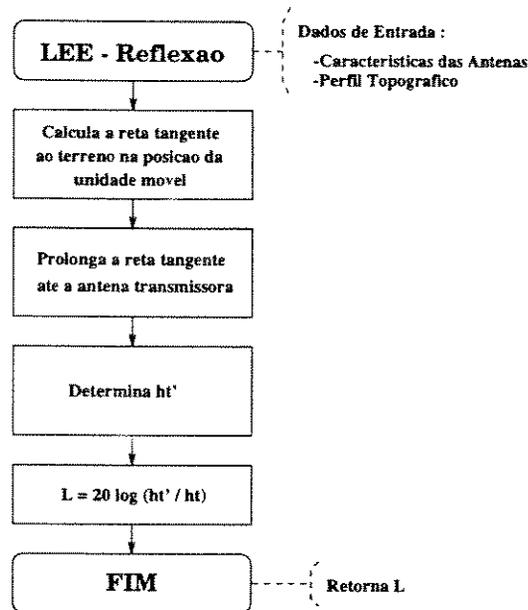


Figura 5.16: Fluxograma - Modelo de Lee (Reflexão).

A Equação 5.2 apresenta bons resultados para valores de m grandes, sendo que os cálculos para um eventual m pequeno é feito com o uso da seguinte redução [43] :

$$\Gamma(m + 1) = m \Gamma(m) \quad (5.3)$$

Dessa forma, a partir da resolução da Equação 5.1 determina-se a potência do sinal corrigida w_0 , sendo que $(100\xi)\%$ da área das localidades está com o sinal maior ou igual a esse limiar w_0 calculado.

5.4 Sumário

O processo de implementação da plataforma de predição de cobertura celular consiste no desenvolvimento de uma *Interface como o Usuário* e de um *Núcleo de Predição de Cobertura* (NPC). Essa divisão do projeto permite ao NPC uma portabilidade para qualquer plataforma de operação, sendo que toda a incompatibilidade fica retida na *Interface com o Usuário*.

O desenvolvimento do *software* foi feito através da linguagem C++ com

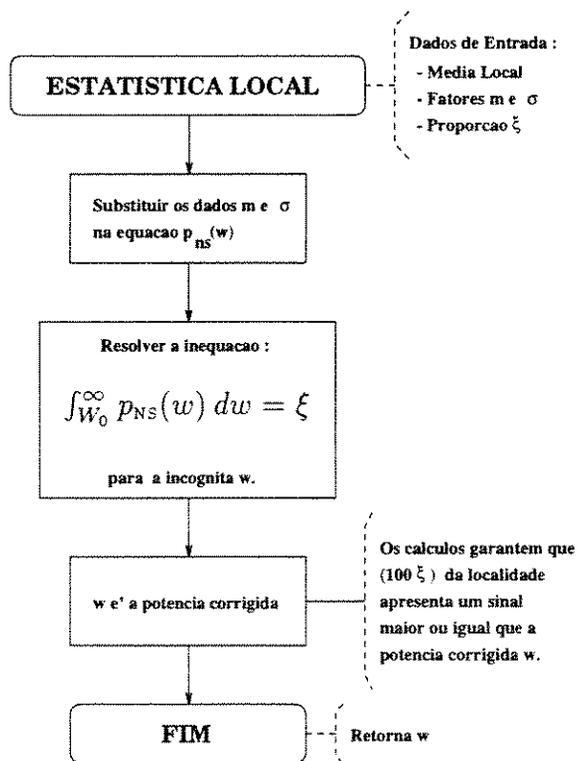


Figura 5.17: Fluxograma - Método da Estatística Local.

um PC/AT386-DOS com o uso de técnicas de POO, em decorrência das características de flexibilidade desejadas.

No desenvolvimento do NPC foi feita a implementação de métodos e modelos de predição de cobertura abordados nos Capítulos 2, 3 e 4 com base nos fluxogramas da Seção 5.3.

Capítulo 6

Simulações e Resultados

Após o desenvolvimento da plataforma de predição de cobertura, especificada e descrita no Capítulo 5, executa-se uma série de simulações para a avaliação dos métodos e modelos bem como para a validação das implementações efetuadas. Em seguida, é desenvolvido um estudo comparativo entre diversos métodos de predição de cobertura.

Dessa forma, esse capítulo foi dividido em duas seções. A Seção 6.1 apresenta o procedimento executado para avaliar e validar as implementações. A partir de perfis topográficos e morfológicos especiais, são feitas análises das características específicas de cada método ou modelo. Já na Seção 6.2 é apresentado o estudo comparativo entre as diversas metodologias com base em um conjunto de simulações. Nesse estudo reside uma certa dificuldade, qual seja a da ausência de dados experimentais (medidas de campo) para uso nas comparações. Portanto, determinadas conclusões ficam comprometidas principalmente com relação à eficiência de cada uma das metodologias.

6.1 Avaliação da Implementação

No processo de avaliação da implementação dos algoritmos dos métodos e modelos para a predição de cobertura, foram necessárias três etapas :

1. Escolha de um perfil topográfico ou morfológico especial.
2. Execução de simulações sobre esse perfil avaliando-se as características do método ou modelo em questão.

3. Confirmação das simulações obtidas através de comparações com cálculos feitos de forma independente do simulador.

A escolha de um perfil especial é desejável para o isolamento das características de cada modelo. Dessa forma, uma escolha apropriada facilita o processo de avaliação da implementação em análise.

Na seqüência desta seção serão apresentados estudos relativos aos modelos empíricos de propagação, difração e reflexão, e do método da estatística local.

6.1.1 Avaliação dos Modelos de Propagação

Os efeitos das perdas por propagação descritos pelos modelos empíricos de propagação são dependentes principalmente de variações no perfil morfológico. Dessa forma, durante esse processo de avaliação, foi utilizado um perfil topográfico sem obstruções e completamente plano. Com isso, os efeitos de difração do sinal e da altura efetiva da antena transmissora são eliminados.

Para uma avaliação completa da implementação dos modelos de propagação foram necessárias cinco simulações sobre diferentes perfis morfológicos :

- Propagação em Área Aberta - (Figura 6.1)
- Propagação em Área Suburbana - (Figura 6.2)
- Propagação em Área Urbana - (Figura 6.3)
- Propagação em Área Urbana Densa - (Figura 6.4)
- Propagação em Múltiplas Morfologias - (Figura 6.5)

Nas quatro primeiras simulações foram utilizados perfis morfológicos constantes, ou seja, são cobertos por uma única morfologia. As simulações efetuadas abrangem os casos de ambientes aberto, suburbano, urbano e urbano denso, sendo que os diversos modelos avaliados foram calibrados previamente com os dados apresentados na Tabela 6.1, para as condições de operação do sistema mostradas na Tabela 6.2. Recordar-se, do Capítulo 2, que os parâmetros

Tabela 6.1: *Ambientes de Propagação - Dados para as Simulações.*

Modelo de Propagação	Tipos de Ambientes (Morfologias)			
	Área Aberta	Área Suburbana	Área Urbana	Área Urb. Densa
Okumura/Hata				
Akeyama	$\alpha = 0\%$	$\alpha = 5\%$	$\alpha = 20\%$	$\alpha = 40\%$
Lee	$\gamma = 45 \frac{dB}{dec}$ $W_0 = -49 dB$	$\gamma = 38,4 \frac{dB}{dec}$ $W_0 = -61,7 dB$	$\gamma = 43,1 \frac{dB}{dec}$ $W_0 = -64 dB$	$\gamma = 30,5 \frac{dB}{dec}$ $W_0 = -84 dB$
Ibrahim-Parsons Emp. e Semi-Emp.	$U = 0\%$ $F = 0\%$	$U = 0\%$ $F = 5\%$	$U = 0\%$ $F = 20\%$	$U = 30\%$ $F = 40\%$

da Tabela 6.1 significam :

- α = Fator de urbanização de Akeyama (Seção 2.2.3).
- γ = Coeficiente angular da reta de perdas em uma determinada morfologia (Seção 2.2.4).
- W_0 = Potência do sinal à distância de 1 milha da antena transmissora (Seção 2.2.4).
- U = Fator de grau de urbanização de Ibrahim-Parsons (Seção 2.2.5).
- F = Fator de urbanização de Ibrahim-Parsons (Seção 2.2.5).

Na primeira simulação obtida, área aberta, os resultados são apresentados na Figura 6.1. O gráfico mostra uma boa correlação entre as curvas dos modelos de Okumura/Hata, Akeyama e Lee, sendo que as divergências observadas são em decorrência de características inerentes de cada modelo¹. Já os modelos empírico e semi-empírico de Ibrahim-Parsons divergem fortemente dos resultados dos três modelos anteriores, mostrando que sua aplicabilidade deve ser restrita a regiões tipicamente urbanas (Seção 2.2.5, Capítulo 2).

¹Como abordado no Capítulo 2, os modelos de Okumura/Hata, Akeyama, Lee e Ibrahim-Parsons foram obtidos através de processos de ajuste de curvas sobre dados experimentais de diferentes regiões. Dessa forma, existe uma divergência inerente entre os modelos devido às diferenças entre os dados experimentais obtidos para cada desenvolvimento específico.

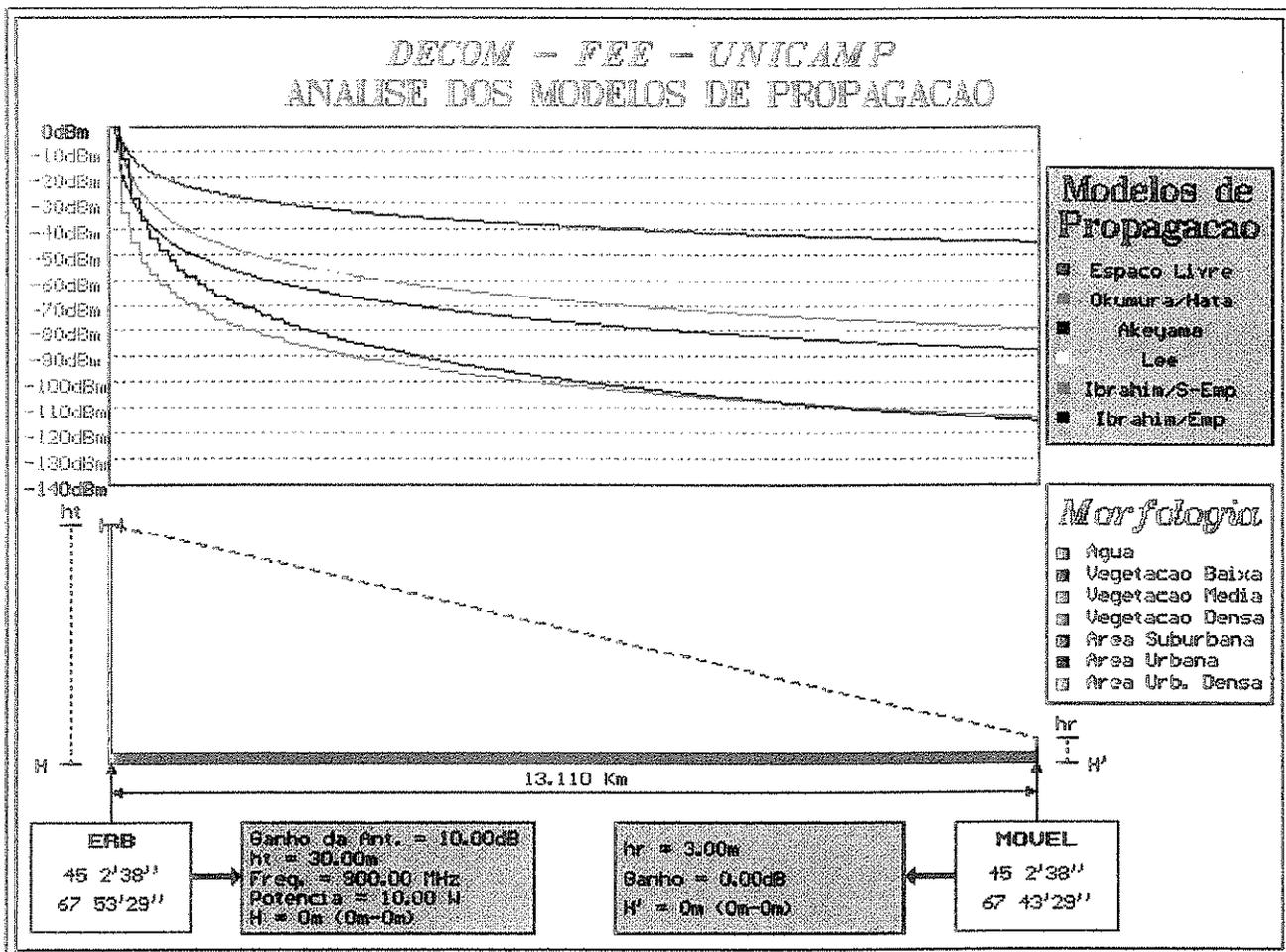


Figura 6.1: Simulação com os Modelos Empíricos de Propagação em uma Área Aberta.

Tabela 6.2: Condições de Operação do Sistema para Simulações.

Frequência (f)	900 megahertz
Altura da Antena Transmissora (h_t)	30 metros
Altura da Antena Receptora (h_r)	3 metros
Potência da Antena Transmissora (Erp)	10 watts
Ganho da Antena Transmissora (G_t)	10 dB
Ganho da Antena Receptora (G_r)	1 dB
Latitude Geográfica da Antena Transmissora	45° 2' 38" S
Longitude Geográfica da Antena Transmissora	67° 53' 29" O
Latitude Geográfica da Antena Receptora	45° 2' 38" S
Longitude Geográfica da Antena Receptora	67° 43' 29" O

A segunda simulação efetuada diz respeito a um ambiente suburbano. Os resultados são apresentados no gráfico da Figura 6.2, onde verifica-se novamente uma boa correlação entre os modelos de Okumura/Hata, Akeyama e Lee. Entretanto, os modelos empírico e semi-empírico de Ibrahim-Parsons novamente divergem dos resultados dos três modelos anteriores, apesar desses desvios serem bem menores que os da primeira simulação (Figura 6.1). Dessa forma, é plausível concluir que os modelos de Ibrahim-Parsons melhoram seu desempenho à medida em que as características da região se aproximam de um ambiente urbano, o que será confirmado com as simulações posteriores desta seção.

As simulações três e quatro têm seus resultados apresentados nos gráficos das Figuras 6.3 e 6.4, respectivamente, e dizem respeito a regiões tipicamente urbanas, no caso uma região urbana e outra urbana densa. Nas duas situações os cinco modelos avaliados apresentam uma boa correlação sendo que as diferenças devem ser atribuídas às características de calibração utilizadas por cada um. Dessa forma, confirma-se a suposição anterior de que os modelos de Ibrahim-Parsons melhoram seu desempenho à medida que as regiões tendem para as tipicamente urbanas.

Outro aspecto importante dos modelos de propagação que deve ser discutido é o caso da propagação por múltiplas morfologias. Para uma avaliação

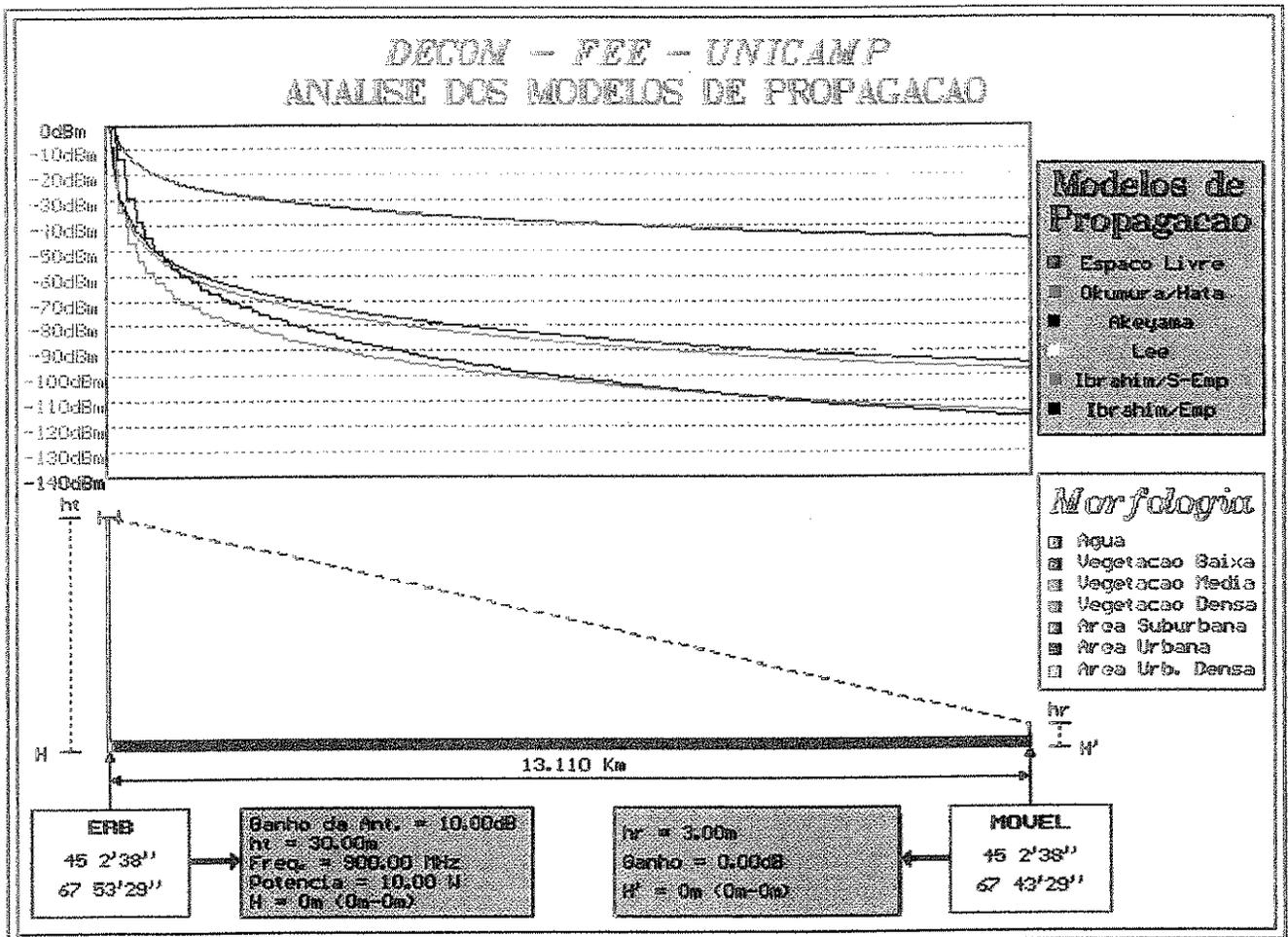


Figura 6.2: Simulação com os Modelos Empíricos de Propagação (Área Suburbana).

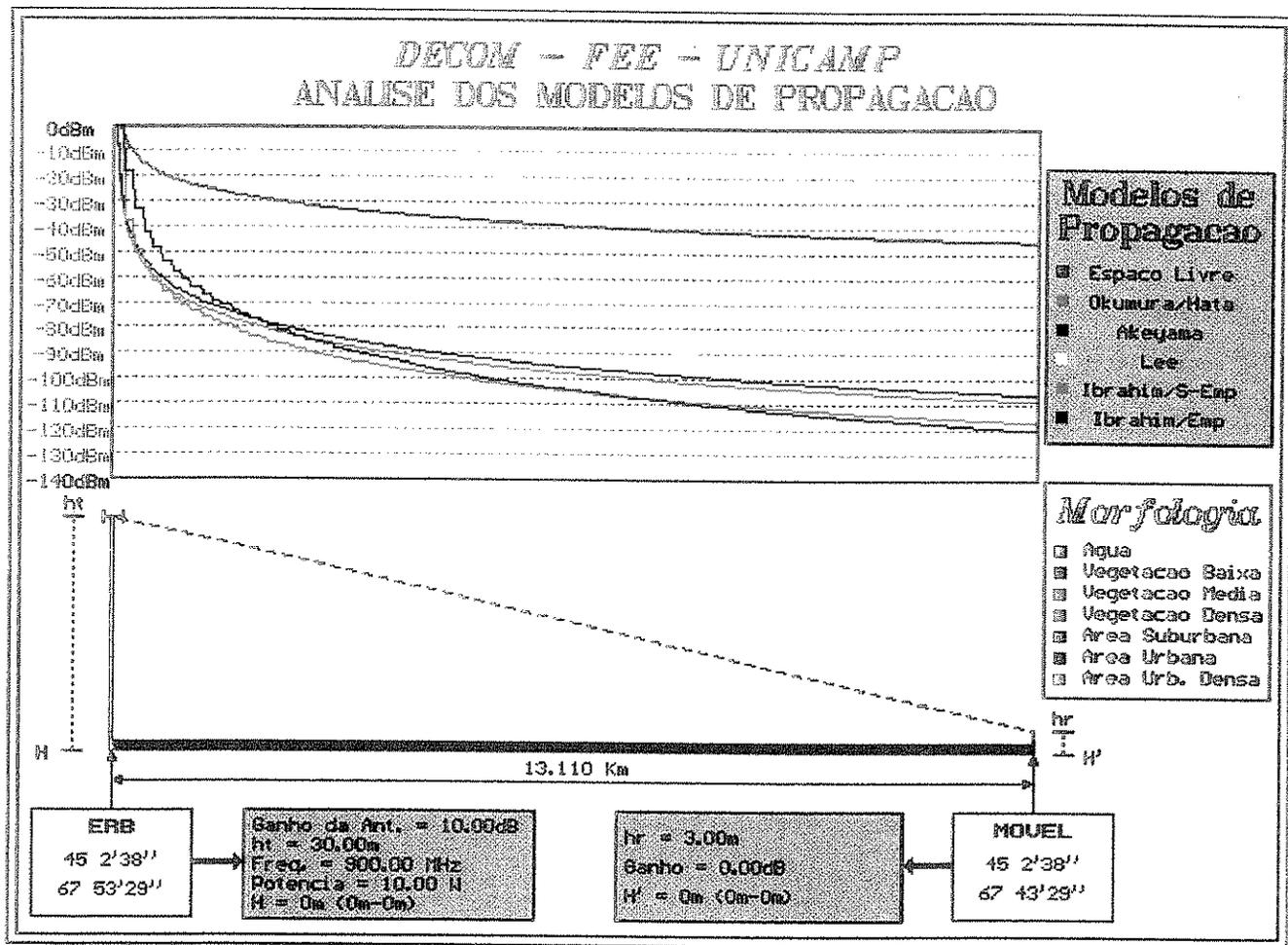


Figura 6.3: Simulação com os Modelos Empíricos de Propagação (Área Urbana).

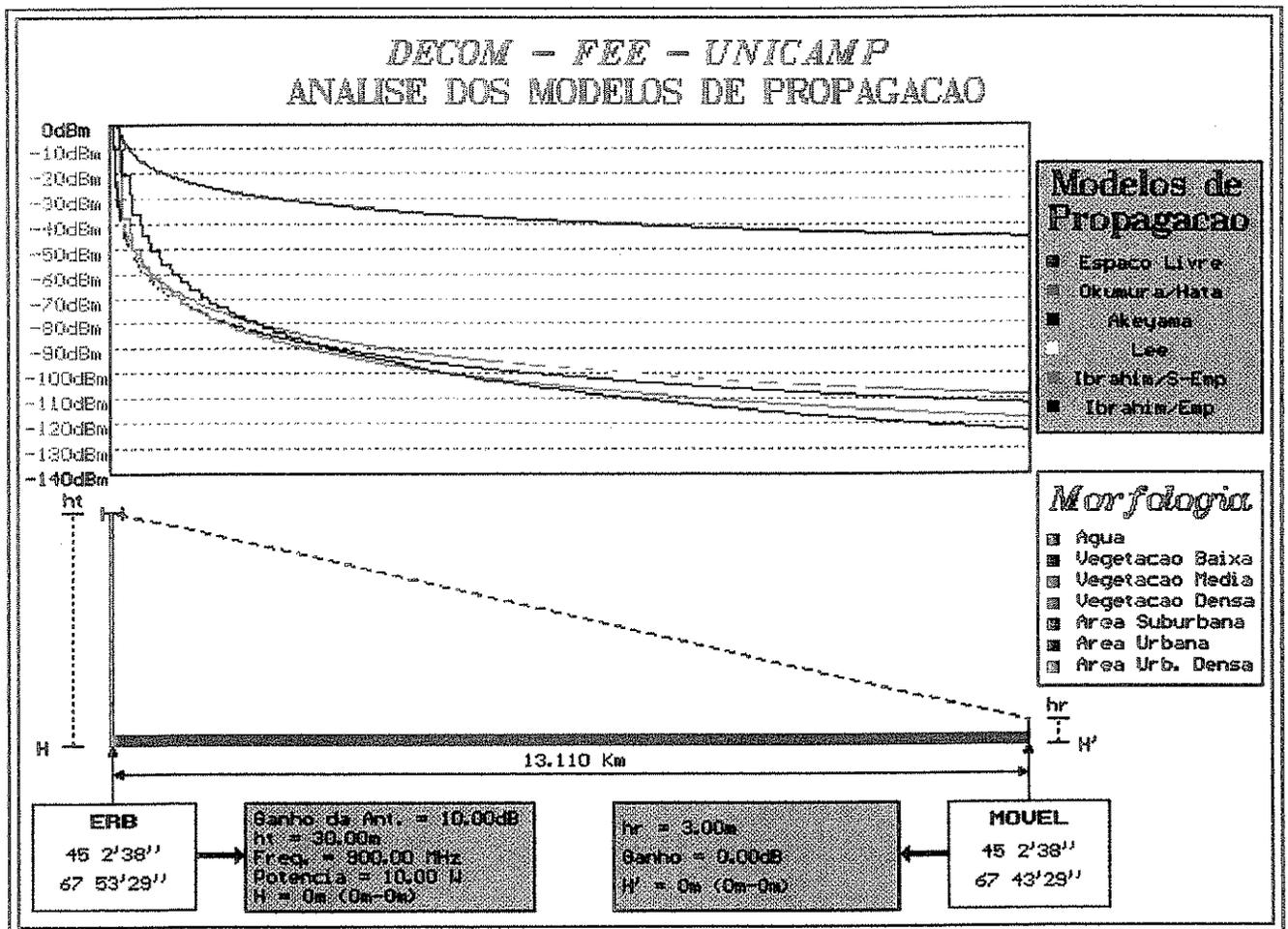


Figura 6.4: Simulação com os Modelos Empíricos de Propagação (Área Urbana Densa).

do comportamento de cada um dos modelos implementados, propõe-se a simulação tendo como base o perfil apresentado na Figura 6.5. O sinal é submetido durante a sua propagação ao efeito de quatro trocas de morfologia :

- De Área Suburbana para Área Urbana
- De Área Urbana para Área Urbana Densa
- De Área Urbana Densa para Área Urbana
- De Área Urbana para Área Suburbana

Pode-se verificar no gráfico (Figura 6.5), que as curvas dos diversos modelos de propagação apresentam três intervalos de análise distintos :

1. Até a primeira troca de morfologia, o sinal se propaga exclusivamente em uma região suburbana, ou seja, os resultados obtidos são os mesmos do gráfico da Figura 6.2.
2. Entre a primeira e a última troca de morfologia, o sinal se propaga em regiões tipicamente urbanas. Nesse caso, grandes diferenças são verificadas, principalmente do modelo Lee em relação aos outros modelos.
3. A partir da última troca de morfologia, o sinal se propaga novamente sobre uma região suburbana, sendo que os modelos de Okumura/Hata, Akeyama e Lee convergem para o mesmo resultado, sendo que os modelos de Ibrahim-Parsons apresentam significativa divergência.

Nessa análise dois pontos estão pendentes. No segundo intervalo da análise, o modelo de Lee apresenta uma divergência significativa dos outros modelos. Essa diferença é em decorrência de uma limitação dos modelos de Okumura/Hata, Akeyama e Ibrahim-Parsons quando na simulação da propagação por múltiplas morfologias, discutida em detalhes pelo Apêndice A. Portanto, o modelo de Lee é na realidade o que apresenta os resultados mais coerentes nesse intervalo de análise. O segundo ponto pendente é a divergência crescente dos modelos de Ibrahim-Parsons que se acentua de forma significativa no terceiro intervalo de análise. Essa divergência é decorrente da restrita aplicação desses modelos para regiões tipicamente urbanas, como foi verificado pelas simulações das Figuras 6.1 e 6.2. Dessa forma, o grande desvio observado é resultado da propagação do sinal sobre as áreas suburbanas do perfil.

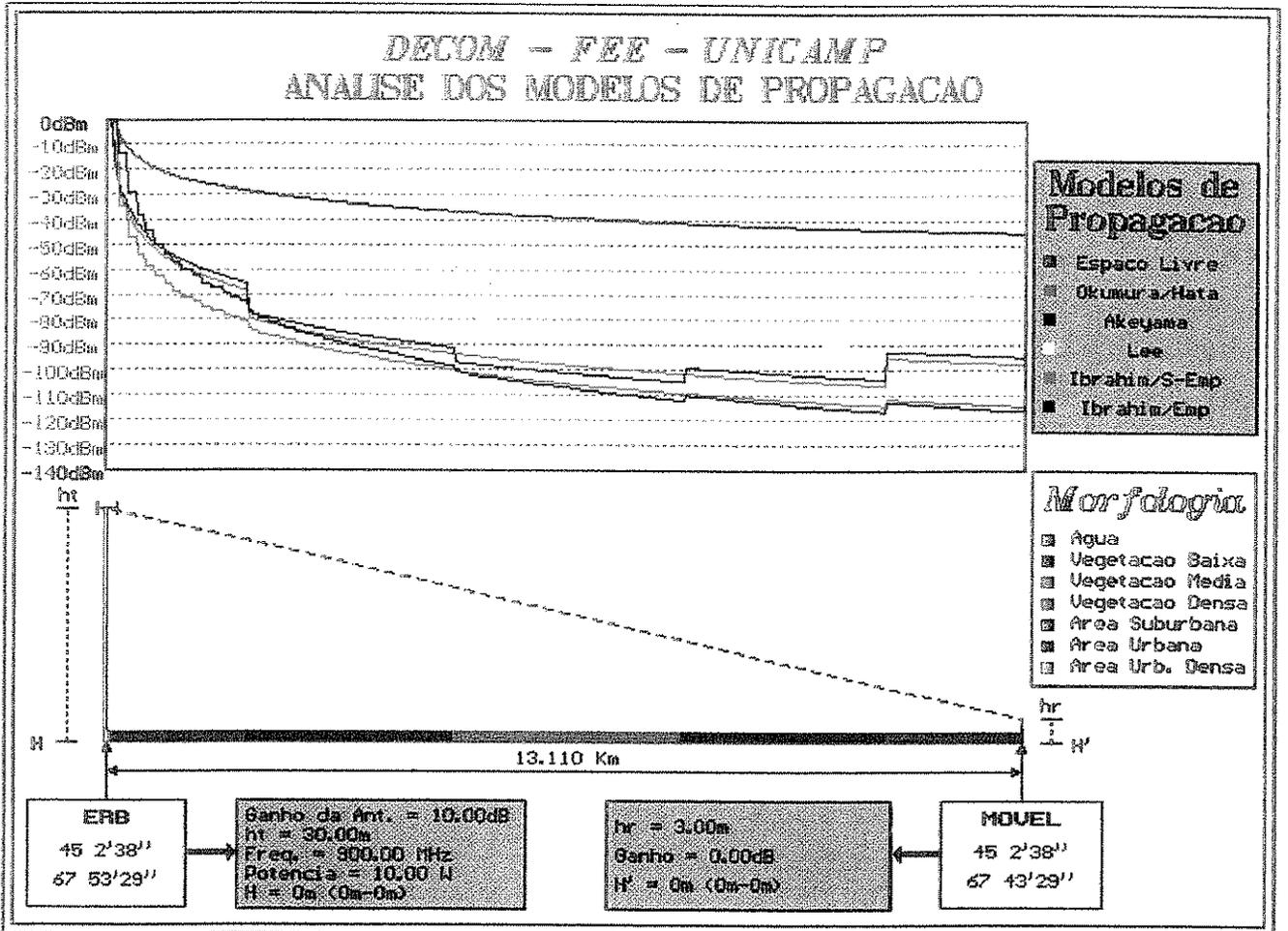


Figura 6.5: Simulação com os Modelos Empíricos de Propagação (Múltiplas Morfologias).

A etapa final dessa avaliação é a confirmação dos resultados simulados através de comparações com cálculos feitos de forma independente do simulador². Durante esse processo, diversas verificações foram feitas sendo que em nenhum caso houve a detecção de divergências. Como as simulações efetuadas abrangem todos as situações abordadas pelos algoritmos dos modelos empíricos de propagação, esta análise pode ser encerrada com a validação das implementações efetuadas.

6.1.2 Avaliação dos Modelos de Difração

O efeito das perdas por difração deve ser estudado através de simulações sobre perfis topográficos com obstruções do tipo gume de faca.

Dessa forma, para uma avaliação da implementação dos modelos de Bullington, Deygout e Giovaneli descritos na Seção 2.3 do Capítulo 2, foram efetuadas as seguintes simulações para as condições de operação da Tabela 6.2 :

- Perfil Topográfico com uma obstrução - (Figura 6.6)
- Perfil Topográfico com quatro obstruções - (Figura 6.7)
- Perfil Topográfico com quinze obstruções - (Figura 6.8)

A primeira simulação obtida tem o objetivo de avaliar a correta implementação do modelo de perdas para uma única obstrução do tipo gume de faca, definido pela Equação 2.5 do Capítulo 2. Como pode-se verificar no gráfico da Figura 6.6, os três modelos convergem para uma curva comum, ou seja, todos recaem, no procedimento de seus algoritmos, no problema de perdas devido a uma obstrução.

Para a análise dos casos de múltiplas obstruções, utiliza-se um perfil topográfico com quatro obstruções (Figura 6.7). Nesse caso, verifica-se o esperado crescimento da divergência dos resultados do modelo de Bullington para os modelos de Deygout e Giovaneli com o aumento do número de obstruções no perfil. Através desse perfil com quatro obstruções são ainda avaliados os algoritmos recursivos dos modelos de Deygout e Giovaneli. Os resultados da Figura 6.7 mostram uma concordância muito grande dos resultados obtidos por esses dois modelos, sendo que invariavelmente as perdas obtidas no modelo de Giovaneli são menores ou iguais que as perdas obtidas pelo modelo de Deygout.

²Esses cálculos independentes consistem em cálculos feitos à mão.

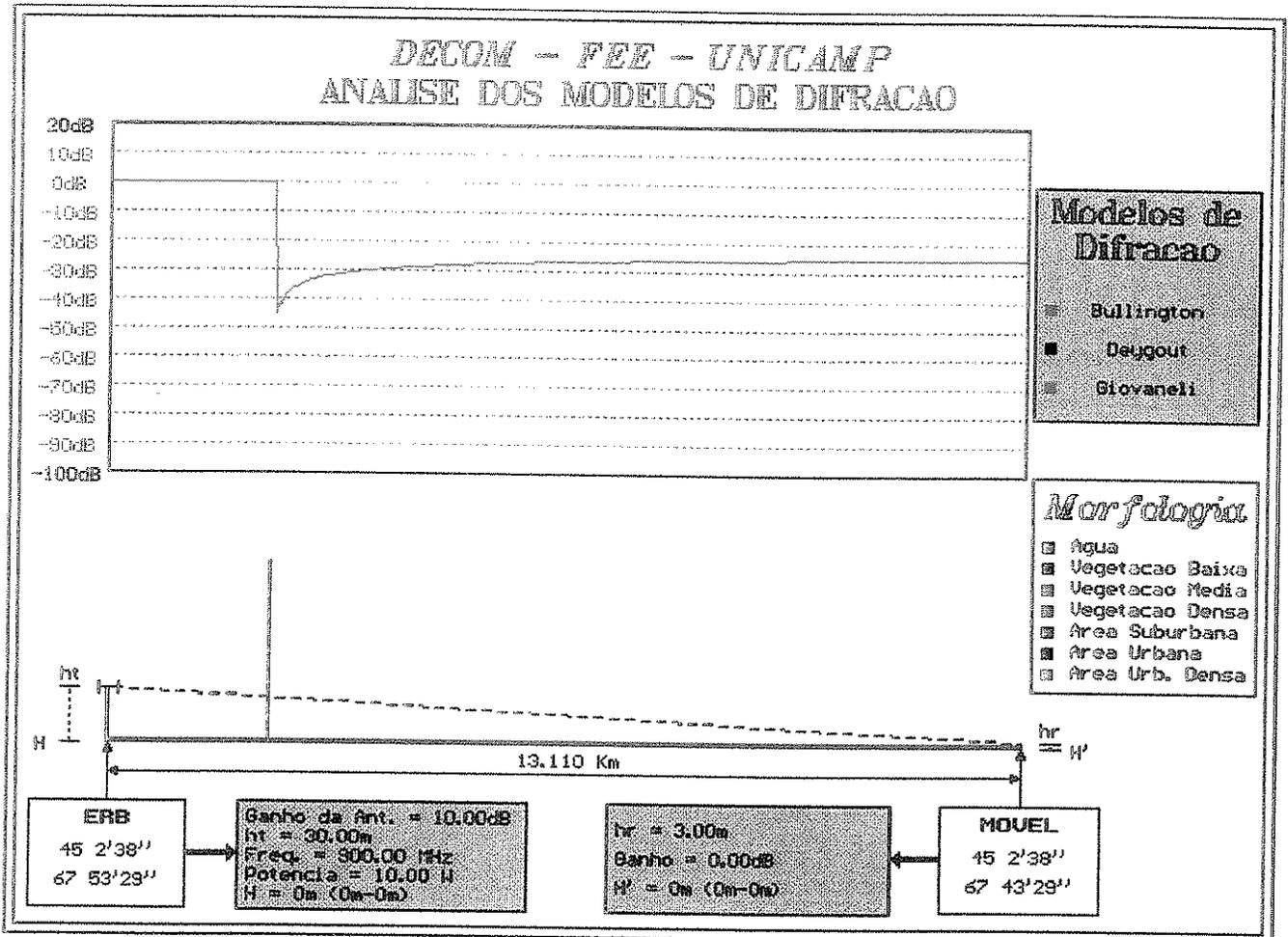


Figura 6.6: Simulação com os Modelos de Difração - Perfil Topográfico com 1 obstrução.

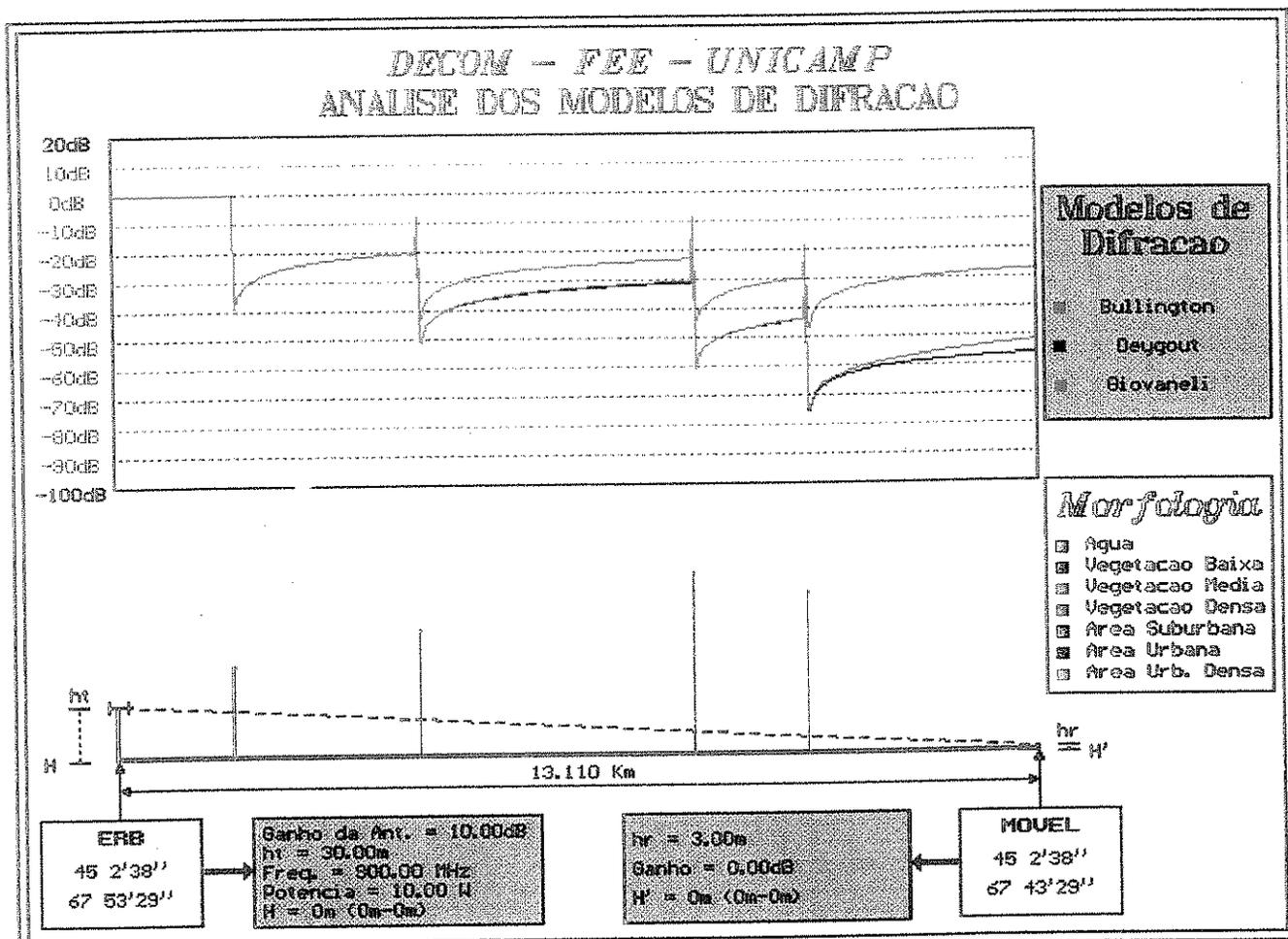


Figura 6.7: Simulação com os Modelos de Difração - Perfil Topográfico com 4 obstruções.

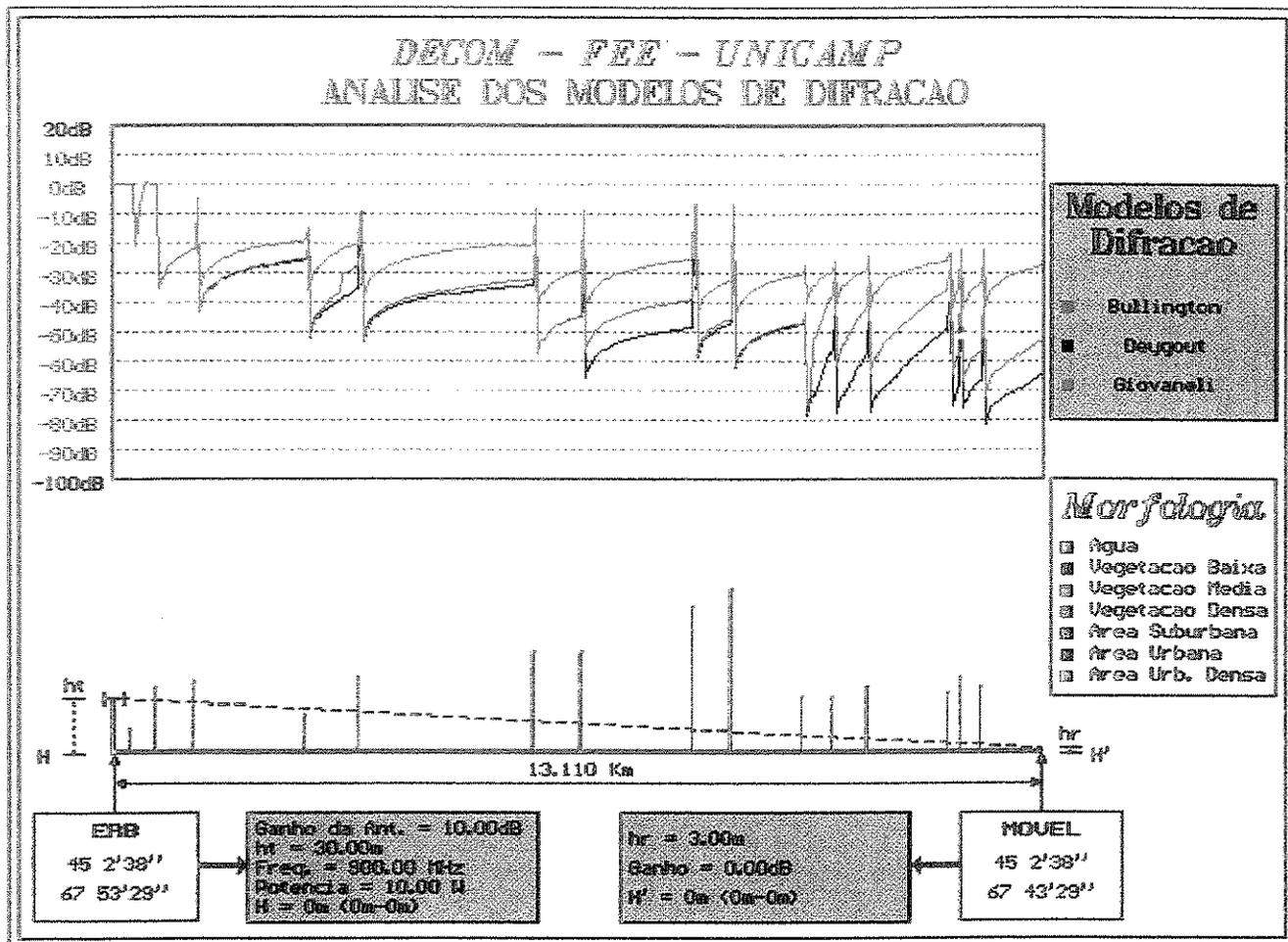


Figura 6.8: Simulação com os Modelos de Difração - Perfil Topográfico com 15 obstruções.

Com o intuito de avaliar o desempenho dos modelos de difração em casos críticos, executou-se a simulação dos modelos de difração sobre um perfil topográfico com 15 obstruções. Os resultados apresentados na Figura 6.8 mostram que os modelos de Deygout e Giovaneli passam a divergir com o aumento do número de obstruções no terreno. Um aspecto interessante observado durante essa simulação foram as performances dos tempos gastos para cada modelo durante os cálculos. Com um número muito grande de obstruções no perfil, os algoritmos recursivos de Deygout e Giovaneli tornam-se lentos. Medidas feitas com um PC/AT386DX (40MHz) sem co-processador definem a seguinte relação entre as performances de cada modelo :

$$t_{\text{Bullington}} \cong \frac{t_{\text{Deygout}}}{24} \cong \frac{t_{\text{Giovaneli}}}{26} \quad (6.1)$$

onde t é o tempo de simulação de um determinado modelo no perfil topográfico da Figura 6.8.

Com base no estudos efetuados por Giovaneli [17] e Pogorzelski [36], a precisão nos cálculos obtidos em cada modelo de difração segue, na grande maioria das situações a seguinte relação :

$$\epsilon_{\text{Bullington}} \geq \epsilon_{\text{Deygout}} \geq \epsilon_{\text{Giovaneli}} \quad (6.2)$$

onde ϵ é uma variável que representa o erro médio dos resultados de um determinado modelo.

Portanto, fica claro que na escolha de um modelo de difração existe a necessidade de uma avaliação do compromisso existente entre precisão dos resultados e tempo de simulação.

Para finalizar a avaliação dos modelos de difração é feita a confirmação dos resultados simulados através de comparações com os resultados de cálculos feitos de forma independente. Várias comparações foram efetuadas não sendo detectada nenhuma diferença.

6.1.3 Avaliação dos Modelos de Reflexão

O estudo do efeito da altura efetiva da antena transmissora é desenvolvido através da variação da inclinação do terreno onde se localiza a unidade móvel. Para tanto foi escolhido um perfil topográfico com diversas inclinações com o objetivo de submeter os modelos propostos por Okumura e Lee a diferentes situações. Na Figura 6.9 são apresentados os resultados da simulação feita sobre esse perfil, com as condições de operação das Tabela 6.2.

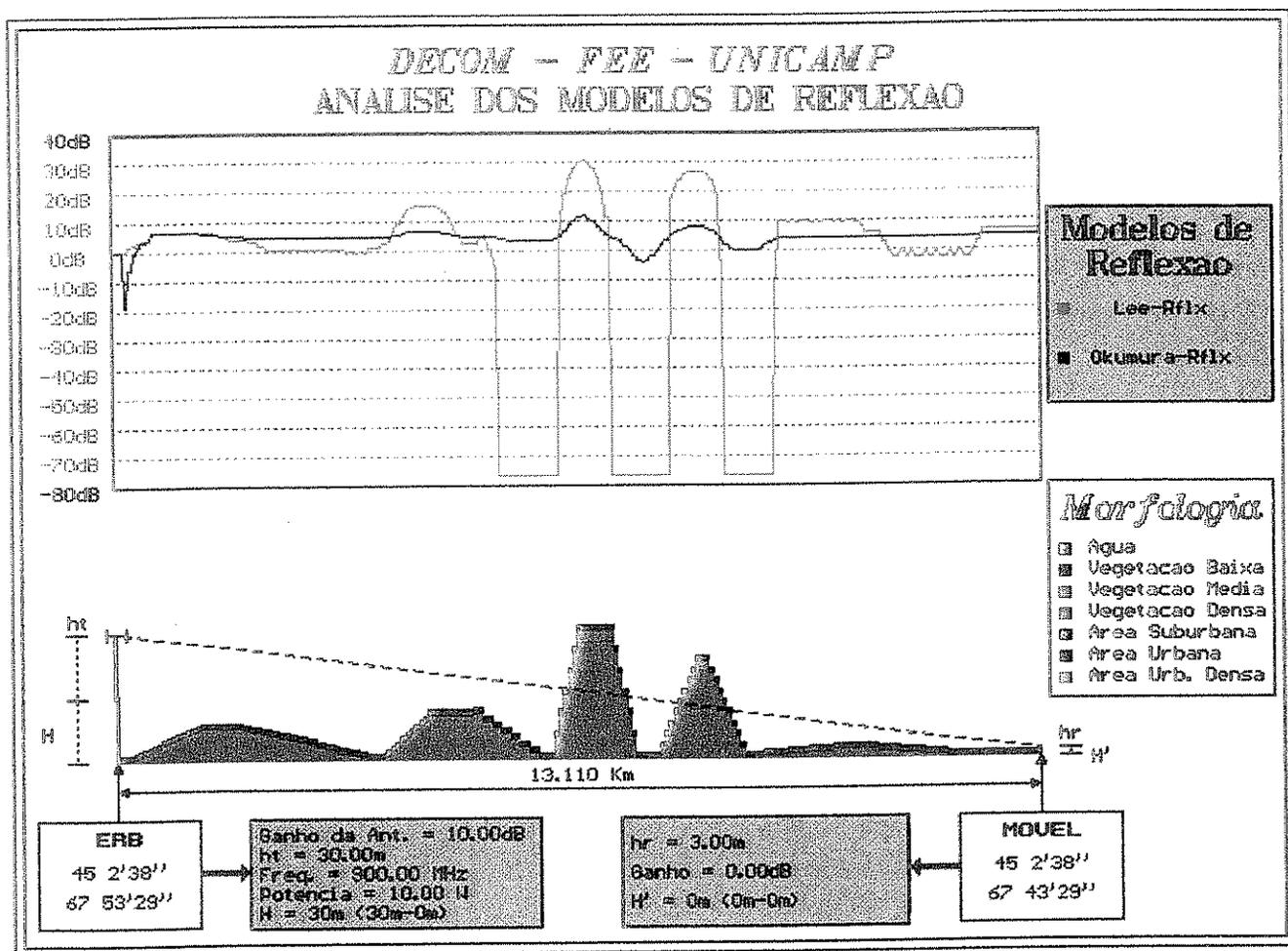


Figura 6.9: Simulação com os Modelos de Reflexão - Perfil Topográfico Especial.

Pode-se observar que as curvas obtidas em cada modelo apresentam grandes disparidades. É verdade que existe uma correlação nas tendências de perdas e ganhos. Entretanto, os níveis dessas perdas e ganhos são bastante diferentes.

Os modelos, quando propostos por seus autores [10, 18], são justificados por ajustes de curvas experimentais, ou seja, cada modelo supostamente apresenta uma correlação com dados de campo. De qualquer forma, uma análise dos resultados da Figura 6.9 gera uma tendência natural a supor que o modelo de reflexão proposto por Okumura é mais coerente. Isso porque as variações abruptas do sinal observados na curva do modelo de Lee não parecem muito razoáveis. Fica até difícil de acreditar que um conjunto de pontos experimentais se ajuste a variações do sinal da ordem de 100 dB entre distâncias da ordem de metros.

Finalmente, verifica-se a validade das implemetações dos modelos de reflexão de Lee e Okumura através da comparação dos resultados obtidos na simulação com cálculos independentes, sendo que, durante esse processo nenhum erro foi observado.

6.1.4 Avaliação do Método Estatístico

A avaliação da implementação do método da estatística local com a distribuição Nakagami Sombreado se resume na verificação da correta implementação das Equações 6.3 e 6.4, que foram desenvolvidas no Capítulo 3, Seções 3.1.6 e 3.2.3, reproduzidas aqui por conveniência :

$$\xi = \int_{w_0}^{\infty} p_{Ns}(w_{ij}) dw_{ij} \quad (6.3)$$

onde,

$$p_{Ns}(w_{ij}) = K(m) \int_0^{\infty} \frac{w_{ij}}{\bar{w}\sigma} \exp \left[\frac{-mw_{ij}}{\bar{w}} - 50 \left(\frac{\log \bar{w} - \log m_w}{\sigma} \right)^2 \right] d\bar{w} \quad (6.4)$$

sendo,

$$K(m) = \frac{m^m}{\Gamma(m)\sqrt{2\pi}} \quad (6.5)$$

Inicialmente são obtidos os gráficos das Figuras 6.10 e 6.11, nos quais verifica-se a correta implementação da Equação 6.4 através da variação dos

parâmetros σ e m . Nessa simulação é possível confirmar as tendências da distribuição Nakagami Sombreado quando submetida a variações dos seus parâmetros. Essas tendências são amplamente abordadas no Apêndice B, sendo que com os gráficos das Figuras 6.10 e 6.11 verifica-se :

- quando m cresce, $p_{NS}(w_{ij}) \rightarrow p_L(w_{ij})$
- quando σ decresce, $p_{NS}(w_{ij}) \rightarrow p_N(w_{ij})$

Em seguida é obtido o gráfico da Figura 6.12, utilizado para verificar a correta implementação da Equação 6.3. O gráfico obtido apresenta o esperado. A medida em que a relação w_0/m_{NS} cresce o valor da proporção ξ diminui.

Finalmente, para validar a implementação do método, foram executados cálculos independentes do simulador, sendo que durante as comparações nenhuma diferença foi detectada.

6.2 Estudo Comparativo

O estudo comparativo dos métodos de predição de cobertura celular foi desenvolvido em duas grandes etapas :

- Estudo Comparativo dos Métodos Empíricos
- Estudo Comparativo do Método Combinado

Na Seção 6.2.1 são apresentados os resultados das comparações entre diversos métodos empíricos de predição de cobertura. A Seção 6.2.2 contém os resultados dos estudos com o método combinado, ou seja, das metodologias que envolvem a combinação dos métodos empíricos com os métodos estatísticos.

6.2.1 Estudo Comparativo dos Métodos Empíricos

Para o desenvolvimento do estudo comparativo entre as metodologias empíricas de predição de cobertura, inicialmente existe a necessidade de definir quais os métodos que serão utilizados nessa comparação.

A plataforma de predição de cobertura desenvolvida permite a combinação de diferentes modelos empíricos de propagação, difração e reflexão, ou seja, uma grande quantidade de metodologias ponto a ponto pode ser obtida. Dessa

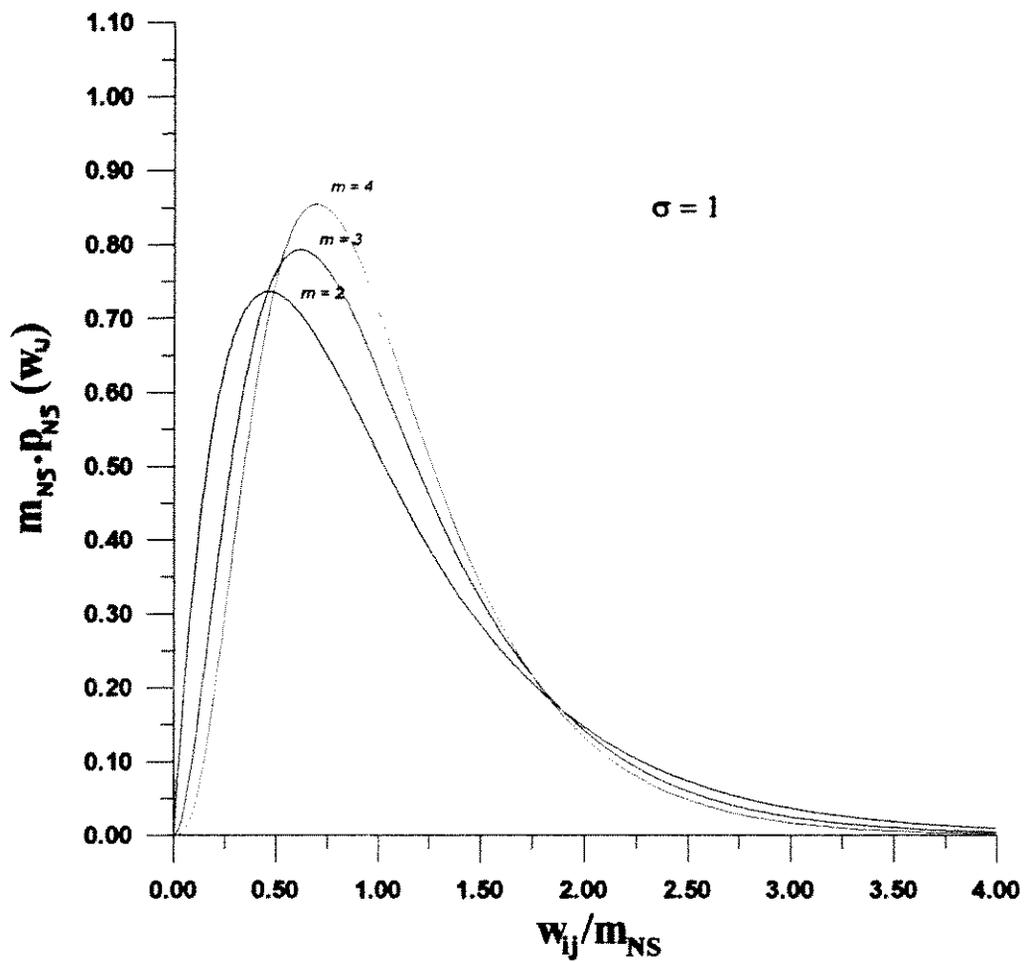


Figura 6.10: Avaliação da Implementação do Método da Estatística Local - Distribuição Nakagami Sombreado com variações de m .

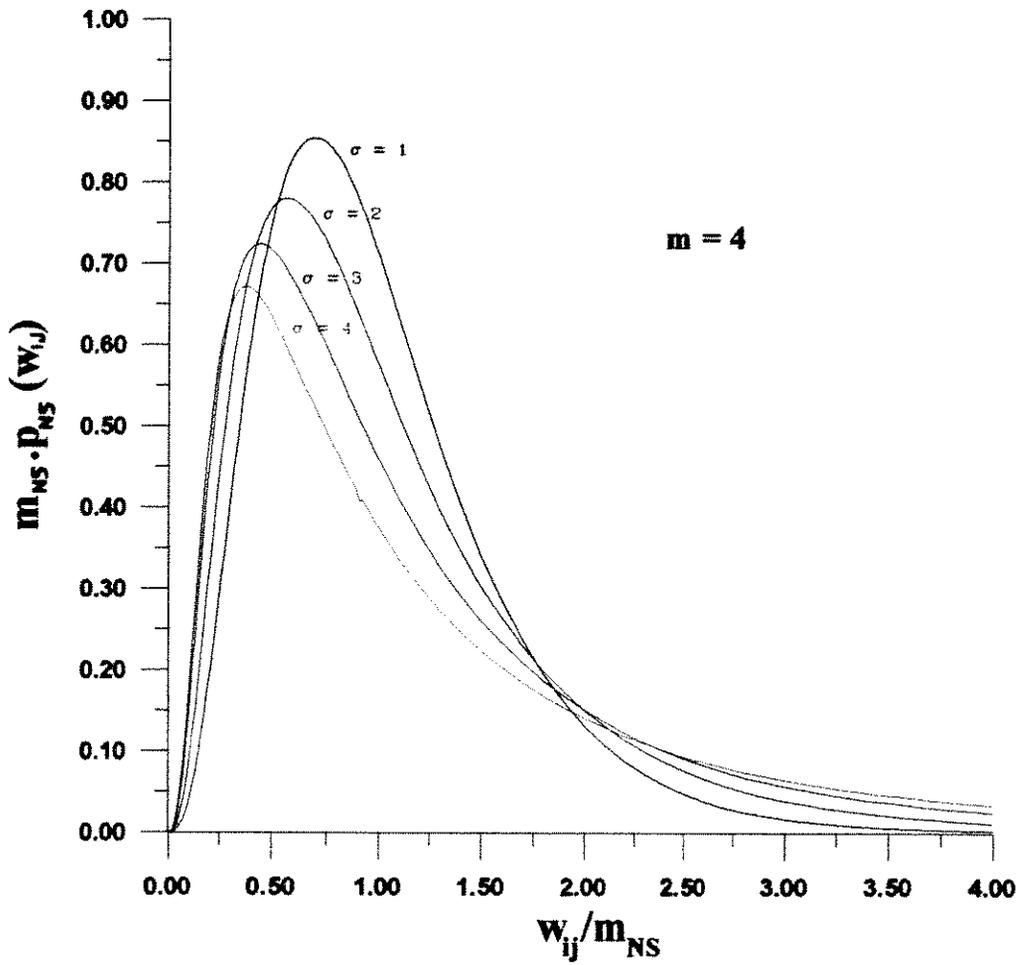


Figura 6.11: Avaliação da Implementação do Método da Estatística Local - Distribuição Nakagami Sombreado com variações de σ .

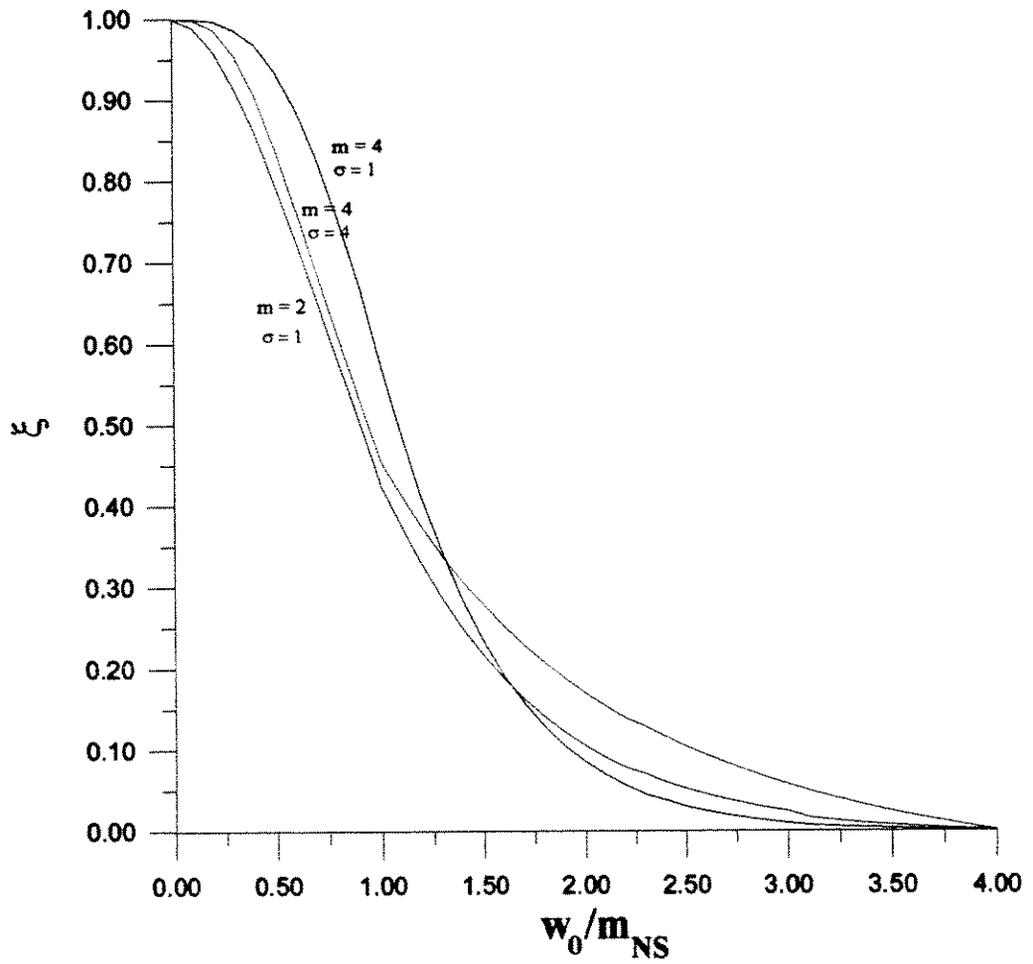


Figura 6.12: Avaliação da Implementação do Método da Estatística Local - Fator ξ para Alguns Ambientes Nakagami Sombreado.

forma, procurou-se escolher, para as futuras comparações dessa seção, os métodos mais consagrados e outros não convencionais que apresentam características de interesse para o estudo³.

A análise feita na Seção 6.1.2 indica que o modelo de difração de Giovaneli apresenta os resultados mais precisos, apesar de exigir um tempo de processamento maior. Na Seção 6.1.3 o modelo de reflexão proposto por Okumura apresenta os resultados mais coerentes. Assim, pode-se dizer que os métodos mais interessantes são os que utilizam os modelos de Giovaneli e Okumura na descrição dos efeitos de difração e reflexão respectivamente.

Portanto, os seguintes métodos de predição de cobertura empíricos serão comparados :

- Hata/Giovaneli/Okumura⁴
- Akeyama/Giovaneli/Okumura
- Lee/Giovaneli/Okumura
- Ibrahim-Parsons Semi-Empírico/Giovaneli/
- Ibrahim-Parsons Empírico/Giovaneli/
- Lee/Deygout/Lee
- Hata/Bullington/Okumura

O método *Lee/Deygout/Lee* foi incluído nas comparações por ser o método recomendado por Lee em seu livro [18], sendo que o método *Hata/Bullington/Okumura* foi incorporado somente para ilustrar um exemplo da utilização do modelo de Bullington. Já os dois métodos de *Ibrahim-Parsons/Giovaneli/* aparentemente não possuem um modelo de reflexão. Na realidade, no próprio desenvolvimento dos modelos de propagação de Ibrahim-Parsons foi embutido

³De fato, esta é uma escolha quase que subjetiva. A flexibilidade da plataforma de predição desenvolvida permite o uso de uma grande quantidade de métodos inclusive as combinações não convencionais.

⁴A nomenclatura utilizada para designar a composição de modelos para a determinação de uma metodologia ponto a ponto possui a seguinte lei de formação :

- (Modelo de Propagação)/(Modelo de Difração)/(Modelo de Reflexão).

um fator de correção H , que computa o efeito da altura efetiva da antena transmissora⁵, ou seja, substitui um modelo de reflexão.

Em seguida, após a definição dos métodos a serem comparados foram feitas três simulações com perfis topográficos genéricos. Os resultados dessas simulações são apresentados nas Figuras 6.13, 6.14 e 6.15.

Na Figura 6.13 é apresentado um caso bem comportado, ou seja, um perfil com morfologia constante e com visada direta entre a transmissão e recepção na maior parte do percurso. Nessa situação, os métodos se comportam de forma semelhante, sendo que a maioria das diferenças podem ser atribuídas às divergências entre os modelos de propagação associados (Seção 6.1.1). Dessa forma, verifica-se que entre os métodos que se diferenciam apenas pelos seus modelos de difração ou de reflexão, as divergências são pequenas. Os métodos *Hata/Giovanelli/Okumura* e *Hata/Bullington/Okumura* apresentam resultados muito semelhantes que se distanciam apenas na região mais próxima da posição final da unidade móvel. O mesmo é observado quando comparam-se os métodos *Lee/Deygout/Lee* e *Lee/Giovanelli/Okumura*.

A segunda simulação obtida nesse estudo é apresentada na Figura 6.14 onde foi escolhido um perfil em quase todo seu percurso obstruído. Novamente os métodos se comportam de forma semelhante. Nesse perfil, devido às obstruções pode-se perceber que ocorrem diferenças entre os métodos que utilizam modelos de difração distintos. O método *Hata/Bullington/Okumura* apresenta uma predição do nível do sinal maior em relação à do método *Hata/Giovanelli/Okumura*, sendo que as diferenças chegam até 13 decibéis. Diferenças também são notadas entre os métodos *Lee/Deygout/Lee* e *Lee/Giovanelli/Okumura*, mas nesse caso as diferenças são bem menores, em torno de 2 decibéis. Os resultados obtidos eram esperados pelas análises da Seção 6.1.2, sendo que fica claro que a escolha de um modelo de difração deve ser feita com critério, afinal consideráveis diferenças foram constatadas.

A escolha do perfil da Figura 6.15 teve como objetivo obter um caso crítico para os modelos de reflexão. Com um perfil topográfico na forma de um platô a simulação obtida aponta para grandes divergências entre os métodos em um determinado segmento do perfil. É bem simples indentificar o referido segmento na Figura 6.15 onde os métodos *Ibrahim-Parsons Semi-Empírico/Giovanelli/*, *Ibrahim-Parsons Empírico/Giovanelli/* e *Lee/Deygout/Lee* apresentam um nível de perdas do sinal muito grande. Essas perdas exageradas são uma carac-

⁵Maiores detalhes sobre o fator de correção H podem ser obtidos na Seção 2.2.5 do Capítulo 2.

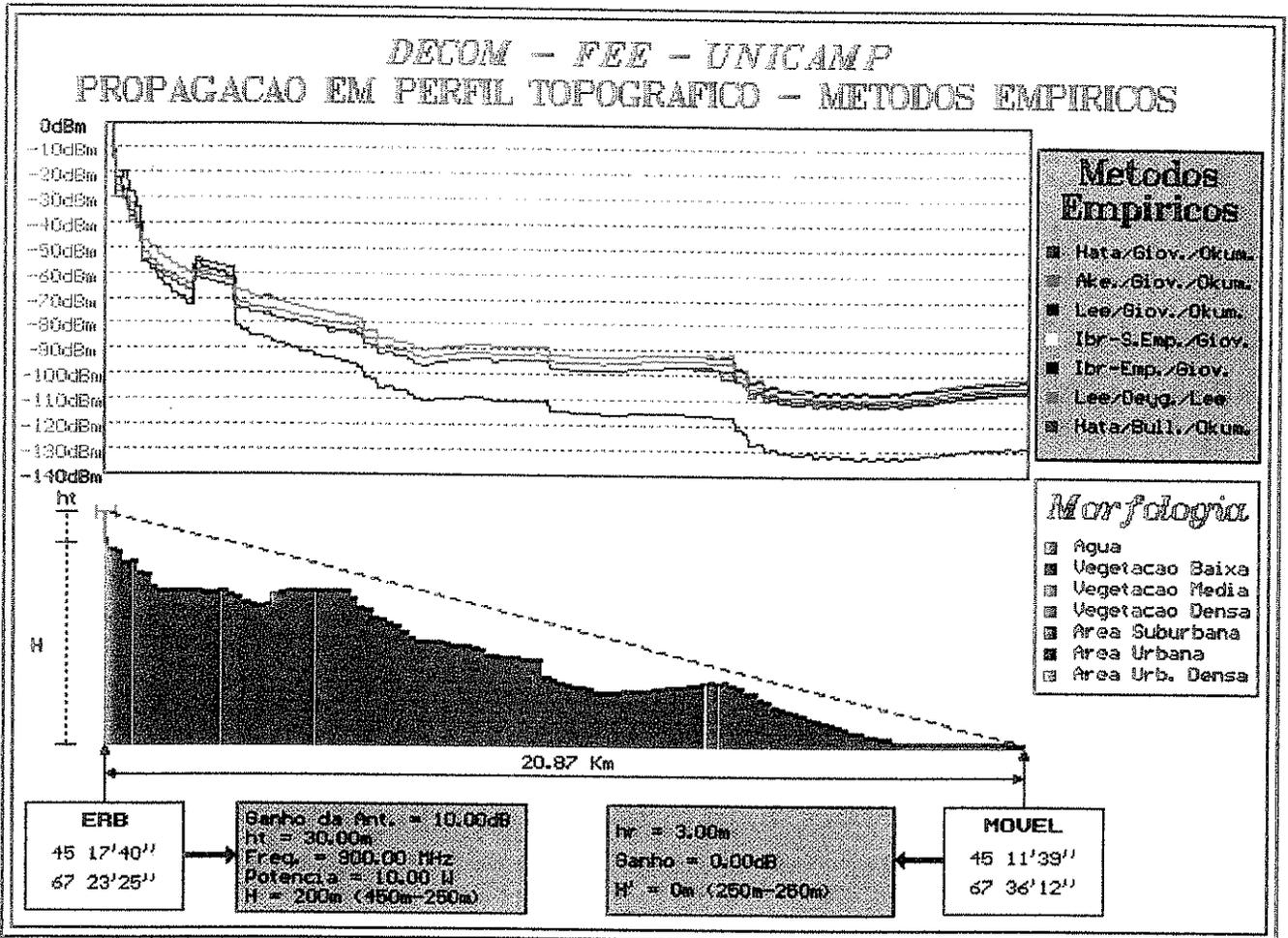


Figura 6.13: Estudo Comparativo entre Metodologias Empíricas - Perfil bem Comportado.

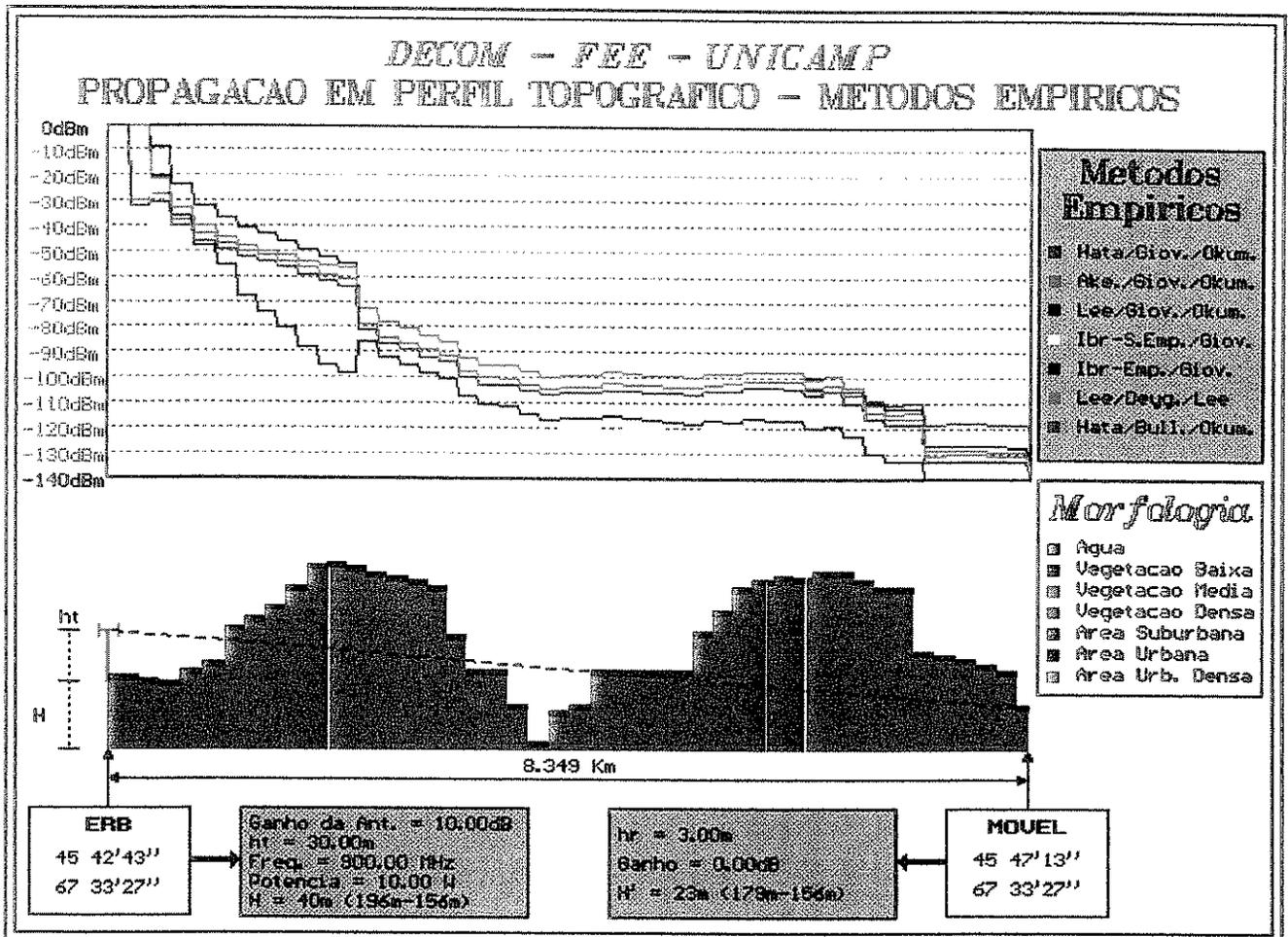


Figura 6.14: Estudo Comparativo entre Metodologias Empíricas - Perfil obstruído.

terística do modelo de reflexão de Lee (Seção 6.1.3) e dos modelos de reflexão de Ibrahim-Parsons, esses embutidos nos respectivos modelos de propagação de Ibrahim-Parsons. Dessa forma, observa-se um comportamento mais coerente por parte dos métodos que utilizam o modelo de reflexão de Okumura.

É importante ressaltar que todas as simulações obtidas nessa seção foram feitas com o uso de terrenos reais, ou seja, os perfis utilizados foram todos obtidos a partir de bases de dados de regiões do globo. Dessa forma, as deficiências apresentadas em cada um dos métodos aparecem regularmente em perfis existentes.

Entretanto, fica difícil, a partir dessas simulações, concluir algo a respeito da qualidade de cada um dos métodos empíricos. Para uma avaliação mais precisa é imprescindível a existência de medidas experimentais. Na realidade, de posse dessas medidas, o processo de avaliação fica extremamente simples, dada a flexibilidade da plataforma desenvolvida em combinar os diversos modelos implementados.

Portanto, não é possível concluir de forma categórica qual método empírico é mais eficiente, mas, com base nas análises desenvolvidas nesse capítulo pode-se sugerir que, uma melhor qualidade dos resultados deve ser obtida com um método que combina um modelo de propagação calibrado para as condições locais, o modelo de difração de Giovanelli e o modelo de reflexão de Okumura.

6.2.2 Estudo Comparativo do Método Combinado

O estudo comparativo do Método Combinado pretende apenas verificar as vantagens na utilização desses métodos em relação à utilização das metodologias de predição puramente empíricas. Para tanto, existiu a necessidade de se eleger um método empírico apenas para efetuar os cálculos da média local do sinal. Existe pouca relevância em qual método empírico escolher e, dessa forma, para as simulações futuras, utiliza-se o método *Hata/Giovanelli/Okumura*.

O principal aspecto a ser abordado nesse estudo são as variações no nível do sinal a partir de mudanças no fator ξ de probabilidade. Para isso, várias simulações em um perfil topográfico foram efetuadas para os seguintes ambientes estatísticos Nakagami Sombreado :

- $m = 2$; $\sigma = 1$ *dB* - (Figura 6.16)
- $m = 3$; $\sigma = 1$ *dB*
- $m = 4$; $\sigma = 1$ *dB*

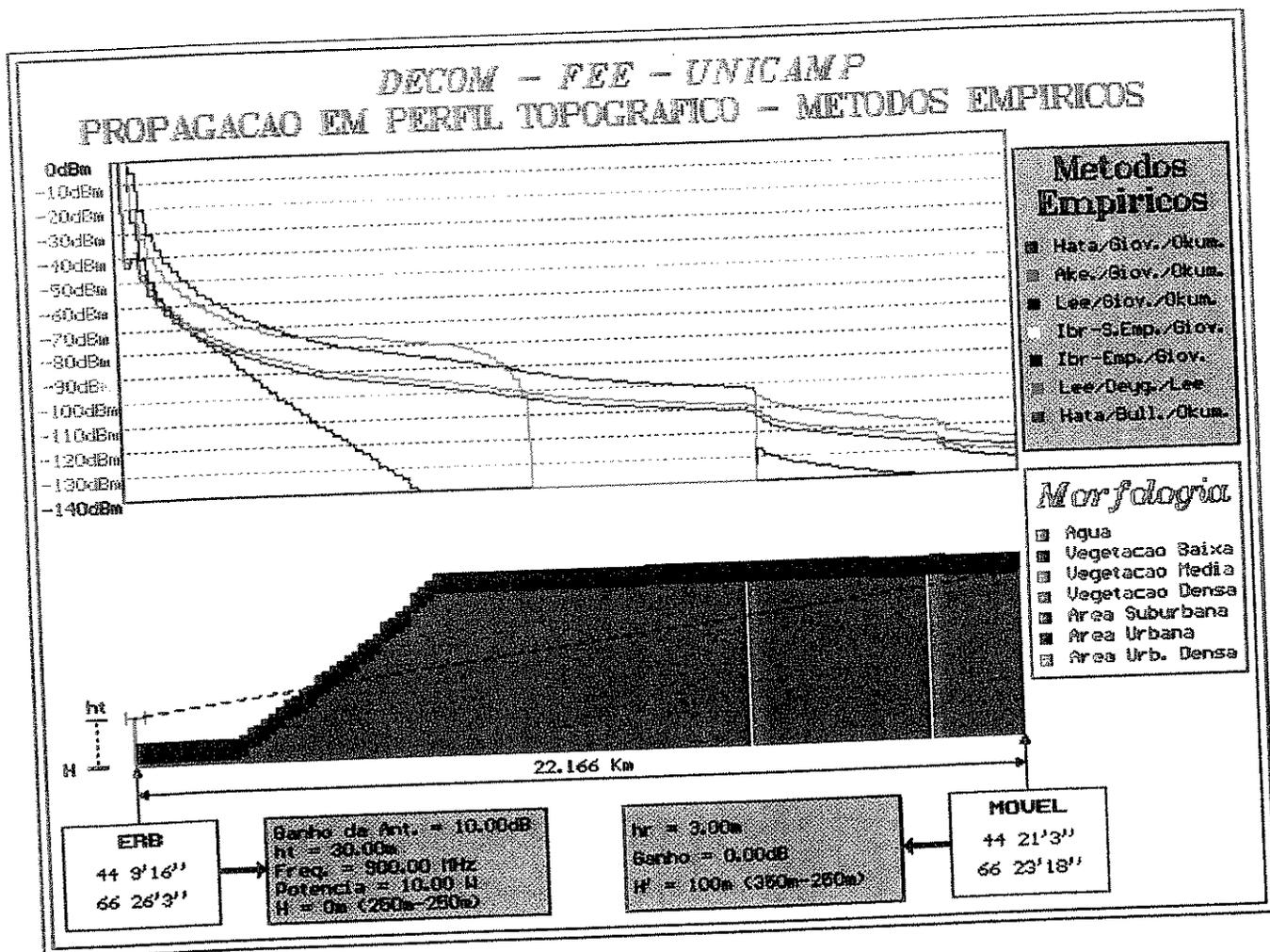


Figura 6.15: Estudo Comparativo entre Metodologias Empíricas - Perfil com um Platô.

Tabela 6.3: Resultados das Simulações com o Método Combinado.

Ambiente de Propagação	$d_{\xi(10\%)} [dB]$	$d_{\xi(30\%)} [dB]$	$d_{\xi(70\%)} [dB]$	$d_{\xi(90\%)} [dB]$	$\Delta_{d_{\xi(10\%-90\%)}} [dB]$
$m = 2, \sigma = 1$	3,55 dB	1,47 dB	-1,50 dB	-4,38 dB	7,93 dB
$m = 3, \sigma = 1$	3,01 dB	1,31 dB	-1,150 dB	-3,29 dB	6,30 dB
$m = 4, \sigma = 1$	2,49 dB	1,01 dB	-0,99 dB	-2,74 dB	5,23 dB
$m = 5, \sigma = 1$	2,22 dB	0,89 dB	-0,85 dB	-2,38 dB	4,60 dB
$m = 6, \sigma = 1$	1,90 dB	0,80 dB	-0,74 dB	-2,08 dB	3,98 dB
$m = 4, \sigma = 4$	4,32 dB	1,80 dB	-1,37 dB	-3,61 dB	7,93 dB
$m = 4, \sigma = 10$	4,89 dB	2,22 dB	-1,51 dB	-3,85 dB	8,74 dB

- $m = 5 ; \sigma = 1 dB$
- $m = 6 ; \sigma = 1 dB$ - (Figura 6.17)
- $m = 4 ; \sigma = 4 dB$
- $m = 4 ; \sigma = 10 dB$ - (Figura 6.18)

Para todos os ambientes listados foram obtidas curvas para os valores de $\xi = 10\%$, 30% , 50% , 70% e 90% , sendo que, para apenas os três ambientes destacados, são mostradas as figuras com os resultados das simulações.

Entretanto, a Tabela 6.3 resume os resultados obtidos em todas as simulações sendo que as Figuras 6.16, 6.17 e 6.18 ilustram as três destacadas.

Para a compreensão da Tabela 6.3, d_{ξ} deve ser definido. Essa variável foi criada para quantificar a distância entre as curvas obtidas nas simulações quando $\xi \neq 50\%$ e a curva de $\xi = 50\%$, que é a mediana da distribuição estatística. Pode-se observar que d_{ξ} aumenta com o crescimento dos valores de m e σ . Esses resultados confirmam tendências esperadas de um aumento da variância da distribuição Nakagami Sombreado, com o crescimento dos parâmetros m e σ .

Ainda analisando a Tabela 6.3, dois aspectos podem ser verificados que determinam vantagens na utilização do método combinado em relação ao uso de metodologias unicamente empíricas. O primeiro aspecto diz respeito aos valores de $\Delta_{d_{\xi(10\%-90\%)}}$ que é definido como :

$$\Delta_{d_{\xi(10\%-90\%)}} = d_{\xi(10\%)} - d_{\xi(90\%)} \tag{6.6}$$

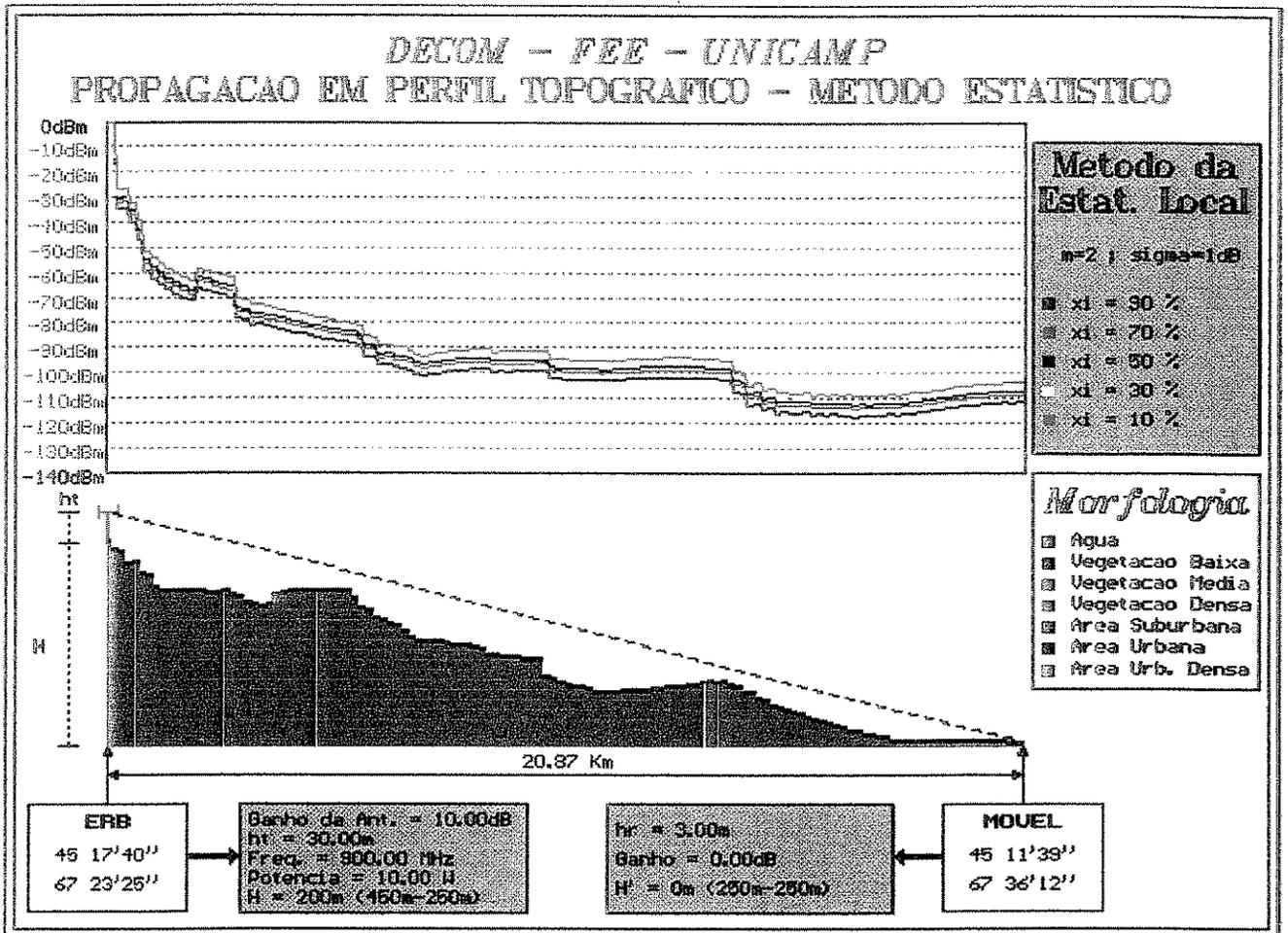


Figura 6.16: Estudo Comparativo do Método Combinado - Variações de ξ para $m = 2$ e $\sigma = 1$ dB.

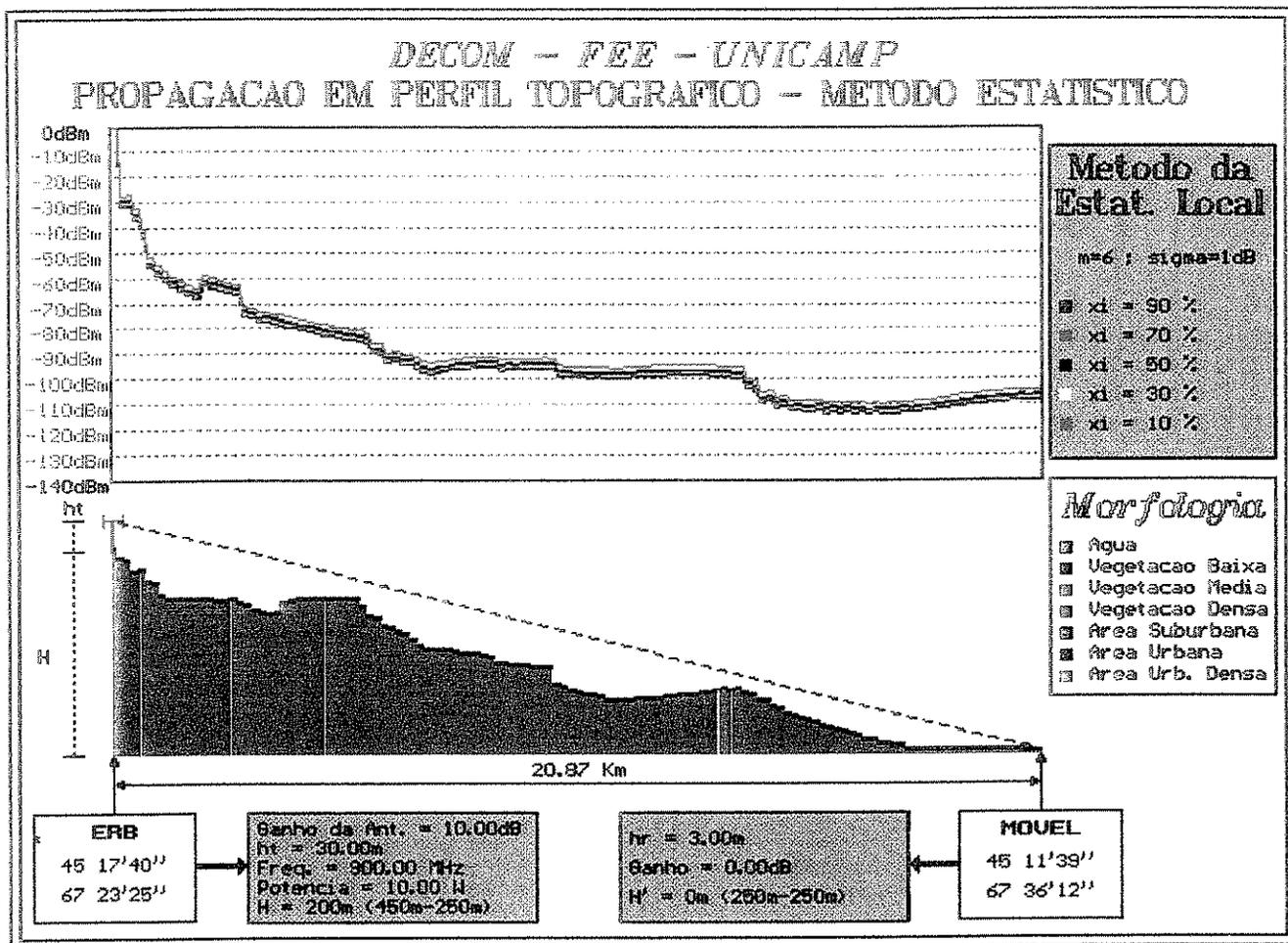


Figura 6.17: Estudo Comparativo do Método Combinado - Variações de ξ para $m = 6$ e $\sigma = 1$ dB.

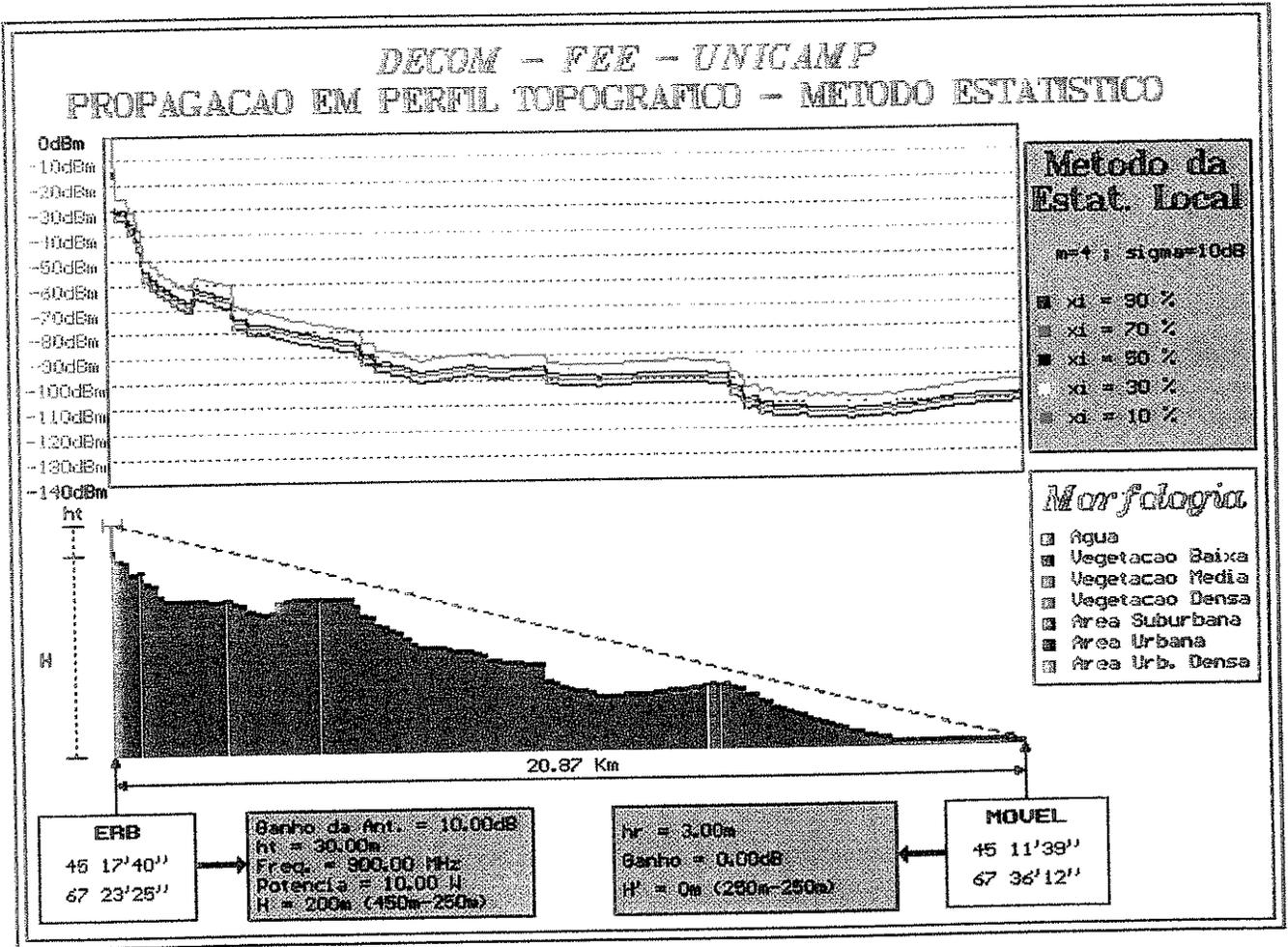


Figura 6.18: Estudo Comparativo do Método Combinado - Variações de ξ para $m = 4$ e $\sigma = 10$ dB.

Os valores obtidos para Δd_ξ demonstram que a excursão do sinal nessa faixa do fator ξ podem ser significativas chegando até a 8,74 decibéis. Dessa forma a estatística local pode ser utilizada para tornar um projeto mais ou menos conservador dando uma flexibilidade maior durante a fase de especificação. O termo conservador deve ser entendido como a maior ou menor dificuldade de se garantir a cobertura celular em uma localidade. Assim, se o problema de interferência não é crítico no projeto, podem-se especificar valores maiores para ξ , garantindo dessa forma uma maior probabilidade da existência do sinal calculado na localidade.

O segundo aspecto diz respeito à verificação das colunas da Tabela 6.3. Fixando-se o valor de ξ em um projeto, variações no nível do sinal de até 3 decibéis são verificadas entre os diferentes ambientes. Assim, para garantir uma boa qualidade nas predições é imprescindível um modelamento estatístico.

Dessa forma, fica clara a importância da consideração da estatística do sinal durante os cálculos de predição. A não consideração proporciona erros significativos em algumas situações. Portanto, certamente a predição com o uso do método combinado é mais conveniente do que aquela que usa apenas metodologias empíricas.

6.3 Sumário

Nesse capítulo foram apresentados os resultados obtidos com a plataforma de predição de cobertura celular.

Inicialmente, na Seção 6.1 foram feitos estudos para a validação do método da estatística local e dos modelos empíricos de propagação, difração e reflexão. Durante o processo, as seguintes conclusões e verificações foram obtidas :

- Os modelos de propagação empírico e semi-empírico de Ibrahim-Parsons apresentam bons resultados apenas para regiões urbanas ou urbanas densas.
- Os modelos de Hata, Akeyama e Lee apresentam resultados bastante semelhantes em quase todos os ambientes morfológicos abordados. Somente em áreas abertas o modelo de Akeyama apresenta desvios consideráveis.
- Na propagação por múltiplas morfologias o modelo de Lee se adapta de forma mais eficiente.

- Dentre os modelos de difração, o proposto por Giovaneli é o mais preciso apesar de exigir um tempo de processamento maior.
- O modelo de reflexão de Okumura apresenta resultados coerentes, sendo que nos resultados do modelo de reflexão proposto por Lee, variações abruptas do sinal são verificadas, levando a crer na existência de alguma inconsistência por parte desse modelo.
- No ambiente Nakagami Sombreado variações dos parâmetros σ e m verificaram as tendências dessa distribuição, abordadas em detalhes no Apêndice B.
- Foram feitas comparação dos resultados de todas as simulações com cálculos feitos de forma independente. Dessa forma, ao final de cada análise foi verificada a completa validade dos métodos e modelos para predição de cobertura.

Na Seção 6.2, foi efetuado um estudo comparativo entre as metodologias de predição de cobertura celular. Esse estudo foi dividido em duas etapas : um estudo apenas com as metodologias empíricas e um estudo do método combinado. No estudo das metodologias empíricas, as conclusões sobre a qualidade de cada um dos métodos ficaram comprometidas pela ausência de dados experimentais. Entretanto, com base nas análises e simulações, foi sugerido como um provável método eficiente, a combinação de um modelo de propagação calibrado para as condições locais, com os modelos de Giovaneli e Okumura para os cálculos da difração e reflexão do sinal, respectivamente. O estudo comparativo do método combinado verificou as vantagens na utilização desses métodos. Através de simulações, constatou-se que o uso dessas metodologias gera uma maior flexibilidade na etapa de especificação do projeto, além da obtenção de resultados mais precisos em relação às metodologias puramente empíricas.

Capítulo 7

Considerações Finais

O principal objetivo a que se propôs esta tese foi a implementação da plataforma flexível de predição de cobertura celular com métodos empíricos e estatísticos combinados. Para efetivar a implementação, diversos outros trabalhos foram desenvolvidos passando desde o estudo das diversas metodologias até a implementação propriamente dita (Capítulos 2, 3, 4 e 5). Durante o processo, diversas contribuições foram formalizadas e serão citadas na Seção 7.1.

Entretanto, de posse da plataforma desenvolvida, o trabalho foi estendido para a execução de algumas análises e estudos que foram apresentados no Capítulo 6. Essas análises e estudos procuraram verificar a correta implementação dos métodos e modelos, além de comparar alguns desses métodos utilizados para a predição de cobertura celular. As conclusões relativas a cada uma das análises ou estudos feitos são encontradas no decorrer do texto do próprio Capítulo 6.

Em seguida, são apresentadas as contribuições desse trabalho e uma série de proposições para possíveis trabalhos futuros.

7.1 Contribuições da Tese

Durante o desenvolvimento da plataforma de predição de cobertura celular, diversos trabalhos foram efetuados, muitos deles se constituindo em contribuições interessantes. Dentre os assuntos abordados na tese, as contribuições mais significativas foram :

- Implementação de uma Plataforma de Predição de Cobertura Celular flexível, ou seja, que agrega em sua estrutura diversos métodos e modelos empíricos ou estatísticos, sendo que esses podem ser combinados entre si de diversas formas, incluindo as formas não convencionais de combinação, a critério do usuário.
- Proposição do Método da Estatística Local.
- Proposição do método combinado que executa o acoplamento das metodologias empíricas ponto a ponto com o método da estatística local.
- Definição do modelo de reflexão de Okumura extraído através da análise do trabalho de Okumura *et al.* [10].
- Análise das limitações dos modelos empíricos de propagação.
- Análise de características da distribuição Nakagami Sombreado no modelamento estatístico dos ambientes de propagação.

7.2 Proposição para Trabalhos Futuros

- Execução de medidas de campo sobre diversos tipos de terreno para uma avaliação da qualidade dos diversos métodos de propagação.
- Implementação de novos modelos e métodos para a ampliação da estrutura da plataforma para o caso de sistemas de microcélulas e de propagação *Indoor*.
- Estudo de formas de ampliar a aplicabilidade do método da estatística local para os modelos de propagação por área.

- Prover de inteligência a plataforma de modo que, através da análise das características do terreno, a melhor combinação entre métodos e modelos possa ser utilizada em cada ponto do terreno. Da mesma forma, uma decisão inteligente sobre os parâmetros σ e m poderá ser feita para adequar a distribuição Nakagami Sombreado às características locais.

Apêndice A

Limitação dos Métodos Empíricos

Os métodos de propagação descritos na Seção 2.2 do Capítulo 2, apresentam limitações na aplicabilidade dos seus modelos de propagação associados.

A primeira limitação discutida nesse apêndice está relacionada ao problema da propagação por múltiplas morfologias (Seção A.1). A formulação de Hata (Seção 2.2.2) e o método de Ibrahim-Parsons (Seção 2.2.5) apresentam essa limitação, cujas conseqüências são discutidas nas Seções A.2 e A.3.

Como mencionado na Seção 2.2.4, o método de Lee apresenta resultados precisos apenas em situações onde a freqüência de operação do sistema está na faixa de 900 megahertz. Essa limitação é discutida nesse apêndice na Seção A.4.

A.1 Propagação por Múltiplas Morfologias

O problema da propagação por múltiplas morfologias consiste em determinar quais as perdas de um sinal quando submetido, no percurso da propagação, ao efeito de várias morfologias. A Figura A.1 faz uma ilustração, sendo que o sinal se propaga inicialmente por uma área aberta, depois em uma área urbana, em seguida em uma região alagada, e, novamente em uma área aberta.

Uma forma de simplificar esse problema é a consideração de um perfil topográfico com apenas uma das múltiplas morfologias, pelas quais o sinal

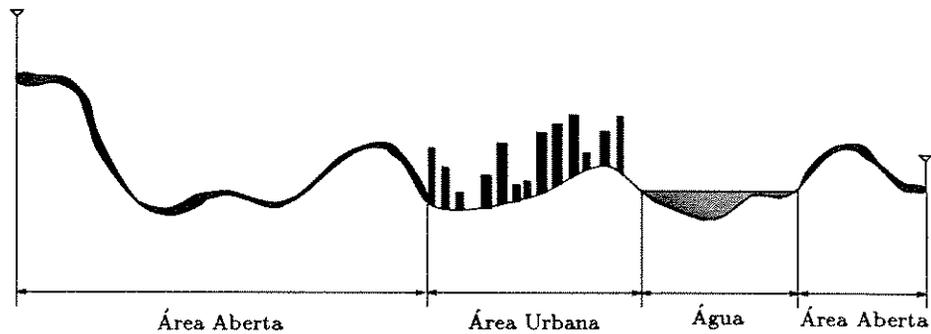


Figura A.1: Propagação por Múltiplas Morfologias.

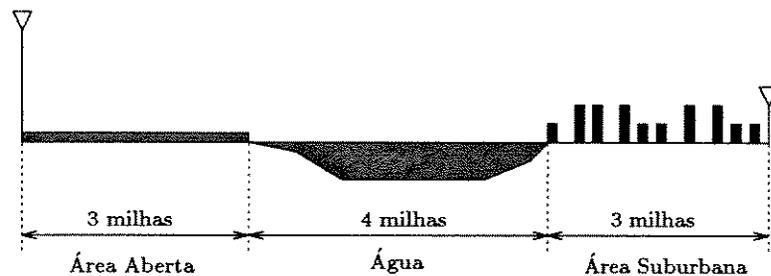


Figura A.2: Perfil Morfológico Exemplo.

se propaga. Reside então, a questão de qual morfologia aproxima melhor o problema. Basicamente três opções são apresentadas :

1. Escolher a morfologia de onde se encontra a antena transmissora.
2. Escolher a morfologia de onde se encontra a unidade móvel.
3. Escolher a morfologia dominante no perfil morfológico, ou seja, a morfologia que cobre o maior segmento do perfil.

Nas três opções apresentadas, certamente grandes distorções vão ocorrer se a morfologia escolhida não cobrir um percentual grande do perfil. Para exemplificar essas distorções, utiliza-se o modelo de propagação proposto por Lee para o perfil morfológico da Figura A.2. O modelo de Lee [18, 33] considera os efeitos das múltiplas morfologias através da composição de retas que representam as perdas do sinal (Seção 2.2.4).

A Tabela A.2 mostra os resultados dos cálculos feitos para antenas transmissora e receptora padrão, propostas na descrição do modelo, para cada uma

Tabela A.1: Dados das Retas de Perdas do Sinal em cada Morfologia.

Morfologia	γ	W_0
Área Aberta	43,5 dB	-49 dBm
Água	20 dB	-45 dBm
Área Suburbana	38,4 dB	-61,7 dBm

Tabela A.2: Perdas na Propagação e Raio de Cobertura.

Situação	Potência do Sinal na Recepção ($d = 10$ milhas)	Raio da Célula ($W \geq -90$ dBm)
Múltiplas Morfologias (Modelo de Lee)	-86,67 dBm	15,16 milhas
Morfologia da Antena Transmissora (Área Aberta)	-92,5 dBm	8,76 milhas
Morfologia da Antena Receptora (Área Suburbana)	-100,1 dBm	5,46 milhas
Morfologia Dominante no Perfil (Água)	-65 dBm	177,83 milhas

das situações enumeradas, confirmando-se assim as mencionadas distorções. Os dados utilizados nos cálculos são definidos na Tabela A.1¹.

Dessa forma, fica difícil ignorar o problema das múltiplas morfologias, ou ainda, aproximá-lo para situações de uma morfologia apenas. Portanto, um modelo que calcula as perdas devido a propagação do sinal deve ser capaz de calcular a influência de cada uma dessas morfologias sobre o sinal.

A.2 A Limitação da Formulação de Hata

Para a combinação dos efeitos das perdas pela propagação devido a N morfologias, através da metodologia ponto a ponto, proposta por Lee, deve-se dividir o caminho de propagação em N subregiões e, em seguida, compor as N retas, que representam as perdas do sinal nas N morfologias (Seção 2.2.4).

A limitação da formulação de Hata é verificada justamente nesse processo de composição das retas. Pelas equações propostas, o valor do coeficiente angular γ das retas de perda de propagação é dado por :

$$\gamma = 44,9 - 6,55 \log(h_t) \quad (\text{A.1})$$

onde h_t é a altura da antena transmissora, sendo que a Equação A.1 é obtida a partir da Equação 2.9.

Pela Equação A.1, verifica-se que o valor de γ independe do tipo de morfologia, e, dessa forma, os efeitos sobre um sinal se propagando por diversas morfologias não são considerados.

Seguindo a metodologia proposta por Lee, para a composição das retas, a formulação de Hata sempre vai aproximar o problema da propagação em múltiplas morfologias para um perfil com a morfologia da posição da estação rádio base. Como verificado através da Tabela A.2, essa aproximação gera desvios consideráveis em algumas situações.

A.3 A Limitação do Método de Ibrahim-Parsons

A limitação do modelo de Ibrahim-Parsons é semelhante àquela vista na formulação de Hata. Tanto para o modelo empírico como para o modelo semi-

¹A definição dos parâmetros utilizados e a compreensão dos cálculos podem ser obtidas na descrição do método de Lee na Seção 2.2.4 do Capítulo 2

empírico propostos (Seção 2.2.5), o valor de γ independe dos fatores U , H e F que caracterizam a morfologia urbana em questão, ou seja :

- Modelo Empírico

$$\gamma = 40 + 14,15 \log \left(\frac{f + 100}{156} \right) \quad (\text{A.2})$$

- Modelo Semi-Empírico

$$\gamma = 40 \quad (\text{A.3})$$

Fica claro pelas Equações A.2 e A.3 que o valor de γ independe de quaisquer fatores relacionados ao tipo de morfologia, e dessa forma os efeitos sobre um sinal se propagando por diversas morfologias não são computados.

Da mesma forma que na formulação de Hata, o modelo de Ibrahim-Parsons aproxima o problema da propagação por múltiplas morfologias para um perfil com a morfologia da posição da estação rádio base. Portanto, como mostra a Tabela A.2, esse tipo de aproximação gera desvios consideráveis em algumas situações.

A.4 A Limitação do Método de Lee

O método proposto por Lee apresenta resultados precisos apenas quando a frequência de operação do sistema é próxima de 900 megahertz. Essa limitação está associada ao fator de compensação de frequências, n , definido na Equação 2.17. Nessa equação o fator n é multiplicado por um termo dependente da frequência. Medidas feitas por Okumura [10] indicam um $n = 30$ decibéis e outras medidas feitas por Young [44] indicam $n = 20$ decibéis. Portanto, existe uma grande imprecisão, na obtenção de n . Para uma avaliação melhor dessa imprecisão define-se Δ_n como :

$$\Delta_n = k \log \left(\frac{f}{900} \right) \quad (\text{A.4})$$

onde k é o tamanho da faixa de imprecisão do fator n em decibéis e $|\Delta_n|$ é o desvio máximo nos cálculos do nível do sinal, ocasionado pela imprecisão do fator n .

Pela Equação A.4 o valor do $|\Delta_n|$ é mínimo quando $f = 900$ megahertz, apresentando valores pequenos em torno desse valor.

Por isso o método de Lee apresenta uma melhor performance em frequências na faixa de 900 megahertz, onde $|\Delta_n|$ é pequeno, e portanto, a imprecisão associada ao fator n é pouco significativa.

A.5 Sumário

Os métodos de propagação propostos por Hata e Ibrahim-Parsons apresentam uma limitação no cálculo das perdas de propagação em situações de múltiplas morfologias. Em ambos os casos, a limitação é causada pelo fato do coeficiente γ ser independente da morfologia, o que aproxima o problema para a simplificação de um perfil com a morfologia da posição da antena transmissora.

Já o método de Lee apresenta uma limitação na faixa de aplicabilidade do método quanto a frequência de operação do sistema. Essa frequência fica limitada a valores em torno de 900 megahertz devido a grande imprecisão do fator de compensação de frequências.

Apêndice B

Distribuição Nakagami Sombreado

Existe um grande interesse em estudos sobre a distribuição Nakagami Sombreado, em decorrência de suas características de flexibilidade no modelamento estatístico de ambientes de propagação. Além de descrever os efeitos sobrepostos de sobreamento e de multipercurso, a distribuição Nakagami Sombreado consiste em uma generalização de todas as distribuições estatísticas abordadas no Capítulo 3.

Como visto na Seção 3.1.6, a distribuição Nakagami Sombreado é definida como [31] :

$$p_{NS}(w) = K(m) \int_0^\infty \frac{w^{m-1}}{\bar{w}^{m+1}\sigma} \exp \left[-\frac{mw}{\bar{w}} - 5 \left(\frac{\log \bar{w} - \log m_w}{\sigma} \right)^2 \right] d\bar{w} \quad (\text{B.1})$$

onde,

$$K(m) = \frac{m^m}{\Gamma(m)\sqrt{2\pi}} \quad (\text{B.2})$$

Nas seções posteriores desse apêndice, será verificada a característica que a distribuição Nakagami Sombreado possui de gerar outras distribuições a partir

de diferentes valores dos parâmetros σ e m , desvio padrão e fator de desvanecimento, respectivamente. Para tanto, será feito o uso do Teorema 1 :

Teorema 1 *Em uma distribuição de probabilidade, quando a variância σ^2 tende a zero, a função densidade de probabilidade tende a uma função impulso sobre a média da distribuição.*

Prova : Duas definições básicas [45] são necessárias :

$$1) \quad \sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \bar{x})^2 p(x) dx \quad p(x) \geq 0 \quad (\text{B.3})$$

$$2) \quad \int_{-\infty}^{\infty} p(x) dx = 1 \quad (\text{B.4})$$

onde x é a variável aleatória, \bar{x} é a sua média e $p(x)$ é a função densidade de probabilidade.

Quando $\sigma^2 = 0$ na Equação B.3, a igualdade só será satisfeita se :

$$\forall x \neq \bar{x} \quad p(x) = 0 \quad (\text{B.5})$$

Para satisfazer a condição B.5, a Equação B.4 fica :

$$\lim_{\epsilon \rightarrow 0} \int_{\bar{x}-\epsilon}^{\bar{x}+\epsilon} p(x) dx = 1 \Rightarrow p(x) = \delta(x - \bar{x})$$

□

Corolário 1 *Quando o fator de desvanecimento m tende a infinito, a distribuição de Nakagami tende a uma função impulso sobre a média da distribuição.*

Prova : Na Seção 3.1.5 do Capítulo 3, o fator de desvanecimento m da distribuição de Nakagami foi definido como :

$$m = \frac{\Omega}{5 \text{Var}(x)} \Rightarrow \sigma^2 = \text{Var}(x) = \frac{\Omega}{5m} \quad (\text{B.6})$$

Dessa forma, quando $m \rightarrow \infty$, fica claro, pela Equação B.6, que $\sigma^2 \rightarrow 0$. Portanto, pelo Teorema 1 a distribuição de Nakagami tende a uma função impulso, ou seja :

$$m \rightarrow \infty \Rightarrow \sigma \rightarrow 0 \Rightarrow p_N(w) \rightarrow \delta(w - \bar{w})$$

□

B.1 Nakagami a partir de Nakagami Sombreado

Para a obtenção da distribuição de Nakagami a partir de Nakagami Sombreado, basta eliminar o efeito de sombreamento fazendo $\sigma = 0$ [31]. Dessa forma, pelo Teorema 1, a distribuição Lognormal associada à distribuição Nakagami Sombreado se torna uma função impulso em $w = \bar{w} = m_w$, logo :

$$\begin{aligned}
 p_{NS}(w)|_{\sigma=0} &= \int_0^{\infty} p_N(w|\bar{w}) p_L(\bar{w})|_{\sigma=0} d\bar{w} \\
 &= \int_0^{\infty} p_N(w|\bar{w}) \delta(\bar{w} - m_w) d\bar{w} \\
 &= p_N(w|\bar{w} = m_w)
 \end{aligned} \tag{B.7}$$

onde $p_N(w)$ é a distribuição de Nakagami.

B.2 Rayleigh a partir de Nakagami Sombreado

Para se obter a distribuição de Rayleigh a partir de Nakagami Sombreado, existe a necessidade de se eliminar o efeito de sombreamento e escolher um valor particular para o fator de desvanecimento m . Fazendo $\sigma = 0$ e $m = 1$ verifica-se que [31] :

$$\begin{aligned}
 p_{NS}(w)|_{\sigma=0, m=1} &= p_N(w)|_{m=1} \\
 &= \frac{1}{m_w} \exp\left(-\frac{w}{m_w}\right) \\
 &= p_r(w)
 \end{aligned} \tag{B.8}$$

onde $p_r(w)$ é a distribuição de Rayleigh.

Como abordado na Seção B.1, fazendo-se $\sigma = 0$, a distribuição Nakagami Sombreado gera a distribuição de Nakagami. Em seguida, fazendo-se $m = 1$, a distribuição de Nakagami gera a distribuição de Rayleigh.

B.3 Rice a partir de Nakagami Sombreado

Para se obter a distribuição de Rice a partir de Nakagami Sombreado, novamente elimina-se a distribuição Lognormal fazendo-se $\sigma = 0$. Nesse caso, o fator de desvanecimento m é determinado pela seguinte relação [31] :

$$k = \frac{a^2}{2\sigma_R^2} = \frac{\sqrt{m^2 - m}}{m - \sqrt{m^2 - m}} \quad m > 1 \quad (\text{B.9})$$

onde k é conhecido como fator de Rice.

Na Seção B.1, ficou provado que fazendo $\sigma = 0$ a distribuição Nakagami Sombreado gera a distribuição de Nakagami. Em seguida, aplicando-se a condição definida pela Equação B.9, verifica-se que :

$$p_{NS}(w)_{\sigma=0, k=\frac{\sqrt{m^2-m}}{m-\sqrt{m^2-m}}} = p_N(w)_{k=\frac{\sqrt{m^2-m}}{m-\sqrt{m^2-m}}} = p_R(w) \quad (\text{B.10})$$

onde $p_R(w)$ é a distribuição de Rice.

B.4 Suzuki a partir de Nakagami Sombreado

A distribuição de Suzuki foi desenvolvida a partir da combinação do efeito de sobreamento modelado por uma distribuição Lognormal, com o efeito de multipercurso modelado por uma distribuição de Rayleigh [1]. Dessa forma, basta fazer $m = 1$ na distribuição Nakagami Sombreado para se obter a distribuição de Suzuki :

$$\begin{aligned} p_{NS}(w)_{m=1} &= \int_0^\infty p_N(w|\bar{w})_{m=1} p_L(\bar{w}) d\bar{w} \\ &= \int_0^\infty p_r(w|\bar{w}) p_L(\bar{w}) d\bar{w} \\ &= p_s(w) \end{aligned} \quad (\text{B.11})$$

onde $p_s(w)$ é a distribuição de Suzuki.

B.5 Rice Sombreado a partir de Nakagami Sombreado

De forma análoga à distribuição de Suzuki, para obter a distribuição Rice Sombreado basta condicionar o fator de desvanecimento m pela Equação B.9, ou seja :

$$\begin{aligned}
 p_{NS}(w)_{k=\frac{\sqrt{m^2-m}}{m-\sqrt{m^2-m}}} &= \int_0^\infty p_N(w|\bar{w})_{k=\frac{\sqrt{m^2-m}}{m-\sqrt{m^2-m}}} p_L(\bar{w}) d\bar{w} \\
 &= \int_0^\infty p_R(w|\bar{w}) p_L(\bar{w}) d\bar{w} \\
 &= p_{RS}(w)
 \end{aligned} \tag{B.12}$$

onde $p_{RS}(w)$ é a distribuição Rice Sombreado.

B.6 Lognormal a partir de Nakagami Sombreado

Para se obter a distribuição Lognormal a partir de Nakagami Sombreado, basta fazer $m \rightarrow \infty$. Impondo essa condição para m , pelo Corolário 1, a distribuição de Nakagami se torna uma função impulso em $w = \bar{w}$, e portanto :

$$\begin{aligned}
 \lim_{m \rightarrow \infty} p_{NS}(w) &= \int_0^\infty \lim_{m \rightarrow \infty} p_N(w|\bar{w}) p_L(\bar{w}) d\bar{w} \\
 &= \int_0^\infty \delta(w - \bar{w}) p_L(\bar{w}) d\bar{w} \\
 &= p_L(w)
 \end{aligned} \tag{B.13}$$

onde $p_L(w)$ é a distribuição Lognormal.

B.7 Sumário

A distribuição de Nakagami Sombreado modela os efeitos de sombreamento e multipercorso sobre um sinal se propagando. Apresenta uma grande fle-

	Condição para σ	Condição para m	Distribuição Resultante
$p_{NS}(w)$	$\sigma = 0$	m qualquer	$p_N(w)$ - Nakagami
	$\sigma = 0$	$m = 1$	$p_r(w)$ - Rayleigh
	$\sigma = 0$	$k = \frac{\sqrt{m^2 - m}}{m - \sqrt{m^2 - m}}$	$p_R(w)$ - Rice
	σ qualquer	$m = 1$	$p_S(w)$ - Suzuki
	σ qualquer	$k = \frac{\sqrt{m^2 - m}}{m - \sqrt{m^2 - m}}$	$p_{RS}(w)$ - Rice Sombreado
	σ qualquer	$m \rightarrow \infty$	$p_L(w)$ - Lognormal

Tabela B.1: Flexibilidade da Distribuição Nakagami Sombreado.

xibilidade e pode, a partir de situações específicas de σ e m , gerar outras distribuições estatísticas, como mostra a Tabela B.1.

Bibliografia

- [1] M. D. Yacoub. *Foundations of Mobile Radio Engineering*. CRC Press, 1993.
- [2] Donald C. Cox. Personal Communications - A Viewpoint. *IEEE Commun. Magazine*, pages 8–20, November 1990.
- [3] G. L. Siqueira; H. J. Thomas and R. S. Cole. An Experimental Study of the Propagation of 55 GHz Millimeter Waves in an Urban Mobile Radio Environment. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 43(1):140–146, February 1994.
- [4] K. Bullington. Radio Propagation at Frequencies about 30 Mc. *Proc. IRE*, 35(10):1122–1136, 1947.
- [5] J. Epstein and D. W. Peterson. An Experimental Study of Wave Propagation at 850 MHz. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 41(1):595–611, May 1953.
- [6] J. J. Egli. Radio Propagation above 40 Mc over Irregular Terrain. *Proc. IRE*, 45(10):1382–1391, October 1957.
- [7] G. Millington ; R. Hewitt and F. S. Immirzi. Double Knife-Edge Diffraction in Field Strength Prediction. *IEE Monograph*, 507E:419–429, March 1962.
- [8] K. Furutsu. On the Theory of Radio Wave Propagation over Inhomogeneous Earth. *J. Res. Nat. Bur. Stad. Rad. Prop.*, 67D:39–62, February 1963.
- [9] J. Deygout. Multiple Knife-Edge Diffraction of Microwaves. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 14(4):480–489, July 1966.

-
- [10] Y. Okumura; E. Ohmori; T. Kawano and K. Fukuda. Field Strength and Its Variability in VHF and UHF Land-Mobile Radio Service. *Review of the Electrical Communication Laboratories*, 16(9-10):825–873, September-October 1968.
- [11] K. Allsebrook and J. D. Parsons. Mobile Radio Propagation in British Cities at Frequencies in the VHF and UHF Bands. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 26(4):313–323, November 1977.
- [12] V. Graziano. Propagation Correlations at 900 MHz. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 27:182–189, 1978.
- [13] A. Blomquist and L. Ladell. Prediction and Calculation Transmission Loss in Different Types of Terrain. *NATO-AGARD Conference Publication*, CP144, March 1974.
- [14] A. G. Longley and P. L. Rice. Prediction of Tropospheric Transmission Loss Over Irregular Terrain. *ESSA Technical Report*, ERL79-ITS67, 1968.
- [15] M. Hata. Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 29(3):317–325, September 1980.
- [16] A. Akeyama; T. Nagatsu and Y. Ebine. Mobile Radio Propagation Characteristics and Radio Zone Design Method in Local Cities. *Review of the Electrical Communication Laboratories*, 30(2):2207–2232, 1982.
- [17] C. L. Giovaneli. An Analysis of Simplified Solutions for Multiple Knife-Edge Diffraction. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 32(3):297–301, March 1984.
- [18] W. C. Y. Lee. *Mobile Communications Design Fundamentals*. Howard W. Sams and Company, 1986.
- [19] J. D. Parsons and M. F. Ibrahim. Signal Strength Prediction in Built-Up Areas. Part 1 : Median Signal Strength. *IEE Proceedings - F*, 130(5):377–384, August 1983.
- [20] J. Walfisch and H. L. Bertoni. A Theoretical Model of UHF Propagation in Urban Environments. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 36(12):345–353, December 1988.

- [21] F. Ikegami; S. Yoshida; T. Takeuchi and M. Umehira. Propagation Factors Controlling Mean Field Strength on Urban Streets. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 31(1):112–120, 1984.
- [22] S. Y. Seidel and T. S. Rappaport. A Ray Tracing Technique to Predict Path Loss and Delay Spread Inside Buildings. *Globecom92 - Orlando*, 1(2), December 1992.
- [23] K. R. Schaubach and T. S. Rappaport. A Ray Tracing Method for Predicting Path Loss and Delay Spread in Microcellular Environments. *42nd VTC - Denver*, 1(1), May 1992.
- [24] Euro COST231. *Hata/COST231 Method for PCS*. COST, 1993.
- [25] C. Nakagami. The m Distribution, A General Formula of Intensity Distribution of Rapid Fading. *Radio Wave Propagation - H. G. Hoffman - Oxford - England*, 1(1):3–36, January 1960.
- [26] R. H. Clarke. A Statistical Theory of Mobile Radio Reception. *Bell System Technology Journal*, 1(47):957–1000, 1968.
- [27] J. D. Parsons and M. F. Ibrahim. Signal Strength Prediction in Built-Up Areas. Part 2 : Signal Variability. *IEE Proceedings - F*, 130(5):385–391, August 1983.
- [28] H. Suzuki. A Statistical Model for Urban Radio Propagation. *IEEE Transactions on Communications*, 25:673–680, 1977.
- [29] F. Hansen and F. I. Meno. Mobile Fading-Rayleigh and Lognormal Superimposed. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 26(4):332–335, November 1977.
- [30] M. J. Marsan; G. C. Hess; S. S. Gilbert. Shadowing Variability in an Urban Land Mobile Environment at 900 MHz. *Electronics Letters*, 26(10):646–648, April 1990.
- [31] L. G. de Rezende Guedes. *Área de Cobertura e Sobreposição de Células no Ambiente Nakagami - Dissertação de Mestrado*. Universidade Estadual de Campinas, 1994.
- [32] D. Parsons. *The Mobile Radio Propagation Channel*. Pentech Press, 1992.

-
- [33] W. C. Y. Lee. *Mobile Communications Engineering*. McGraw Hill, 1982.
- [34] J. L. Hess. *Mobile Communications*. Prentice Hall, 1994.
- [35] S. Kozono and K. Watanabe. Influence of Environmental Buildings on UHF Land Mobile Radio Propagation. *IEEE Transactions on Communications*, 25(10):1133–1143, October 1977.
- [36] R. J. Pogorzelski. A Note on Some Common Diffraction Link Loss Models. *Radio Science*, 17:1536–1540, 1982.
- [37] William C. Y. Lee. Estimate of Local Average Power of a Mobile Radio Signal. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 34(1):22–27, February 1985.
- [38] Douglas O. Reudink. Comparison of Radio Transmission at X-Band Frequencies in Suburban and Urban Areas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 20(1):470–473, July 1972.
- [39] E. J. Leonardo. *Métodos Estatísticos para a Determinação da Área de Cobertura de Células e Microcélulas em Sistemas de Rádio Móvel - Dissertação de Mestrado*. Universidade Estadual de Campinas, 1992.
- [40] Bruce Eckel. *Guia do Usuário C++*. McGraw Hill, 1991.
- [41] Borland. *Borland C++ Programmer's Guide*. Borland, 1991.
- [42] W. H. Press; B. P. Flannery; S. A. Teukolsky and W. T. Vetterling. *Numerical Recipes in C*. Cambridge University Press, 1990.
- [43] Samuel M. Selby. *Standard Mathematical Tables*. CRC Press, 1965.
- [44] W. R. Young. Comparison of Mobile Radio Transmissions at 150, 450, 900 and 3700 MHz. *Bell System Technical Journal*, 1(31):1068–1085, November 1952.
- [45] Athanasios Papoulis. *Probability, Random Variables and Stochastic Process*. McGraw Hill, 1990.