

MARCO ANTONIO BETINI PEREIRA

**ANÁLISE DE MODELOS DE PROPAGAÇÃO NA
ÁREA URBANA DA REGIÃO DE CURITIBA – PR
NA FAIXA DE FREQUÊNCIA DE 1800 MHz**

CURITIBA
AGOSTO – 2007

MARCO ANTONIO BETINI PEREIRA

**ANÁLISE DE MODELOS DE PROPAGAÇÃO NA ÁREA
URBANA DA REGIÃO DE CURITIBA – PR NA FAIXA DE
FREQUÊNCIA DE 1800 MHz**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Telecomunicações, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná – UFPR.

Orientador: Horácio Tertuliano dos Santos Filho, Ph.D

Co-Orientador: César Augusto Dartora, Ph.D

CURITIBA

AGOSTO – 2007

FICHA CATALOGRÁFICA

Pereira, Marco Antonio Betini

Análise de modelos de propagação na área urbana da região de Curitiba – PR na faixa de frequência de 1800 MHz / Marco Antonio Betini Pereira. Curitiba: UFPR/ Setor de Tecnologia / Departamento de Engenharia Elétrica, 2007.

vi, 142 p.: il. xv

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia / Departamento de Engenharia Elétrica, 2007.

1. Modelos de propagação. 2. Características do canal. 3. Comunicação móvel Pessoal. 4. Metodologia de dimensionamento I. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná. II. Título.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Pereira, M. A. B. (2007). Análise de modelos de propagação na área urbana da região de Curitiba – PR na faixa de frequência de 1800 MHz.

Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 142 p.

A Karla e Nicole, esposa e filha,
que com seu carinho me ajudam a
concretizar meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, ao orientador deste trabalho, o professor Doutor Horácio Tertuliano Filho, pelos seus conselhos, por suas críticas e sugestões.

Agradeço ao co-orientador deste trabalho, o professor Doutor César Augusto Dartora, pelos seus conselhos, por suas críticas e sugestões.

Agradeço aos professores e membros da banca examinadora: professor Doutor Evaldo Luiz de Mattos Mehl e professor Doutor Paulo Henrique Portela de Carvalho, por terem se predisposto a ler, comentar e criticar este trabalho.

Agradeço a *Celplan Wireless Technology*, em especial ao Senhor Antonio Vivaldi, pelos seus conselhos, por suas críticas e sugestões.

Agradeço a *Telecom Itália Mobile*, em especial a Engenheira Ivana Naomi Mukai, por terem se predisposto a fornecer os dados técnicos para realização deste trabalho.

Agradeço, aos funcionários e professores do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná.

Agradeço ainda aos meus colegas de mestrado e do laboratório de telecomunicações do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná, contribuindo com preciosas discussões, sugestões e correções.

RESUMO

Quando as características de propagação são estimadas relativamente ao meio, os parâmetros que compõem um sinal aplicado a um sistema móvel (frequência, potência, dentre vários outros) podem ser parametrizados de modo a se obterem boas estimativas do comportamento do mesmo. A predição é crucial quando se trata da concepção ou do projeto de um sistema. Medidas locais do nível de sinal e de sinais interferentes em estações locais são caras. Visando, então, minimizar este problema modelos de propagação foram desenvolvidos com o objetivo de fornecer uma alternativa de baixo custo e de boa eficiência. A modelagem do canal, dentro desta idéia, se insere como o elemento capaz de predizer perdas de trajeto, bem como desvios na resposta da função impulso do canal de propagação. A perda de trajeto está associada ao projeto de estações bases, onde a análise da mesma permite saber quanto um transmissor necessita radiar para prestar um serviço adequado. A caracterização do canal, por outro lado, objetiva a fidelidade dos sinais recebidos, e deve em princípio fornecer a forma de onda original no receptor. O objetivo desta dissertação é a compreensão de vários modelos de propagação visando fornecer uma análise das características do sinal em canais específicos, tanto para a região urbana quanto para a região urbana densa da cidade de Curitiba no estado do Paraná. Para tal, inicialmente é apresentada uma revisão das principais características do canal de rádio frequência, bem como dos vários modelos de propagação para ambientes abertos, isto é fora de edificações e veículos. Após, níveis reais de sinal para estas regiões são analisados e simulados por programa específico. Finalmente traçam-se os comparativos de níveis de sinal, visando um ajuste dos mesmos e então se aponta dentre os modelos analisados e simulados qual o que melhor se adapta às condições locais da capital paranaense, observando-se as limitações e imposições locais.

Palavras-chave: Modelos de propagação, características do canal, comunicação móvel pessoal, metodologia de dimensionamento.

ABSTRACT

When the propagation characteristics are esteem relatively to the way, the parameters that compose a signal applied to a mobile system (frequency, power, amongst several others), can be esteem in order to get good estimates of the behavior of the same. Soon, the prediction of the signal, nothing more is that the forecast of the behavior, in the case of the cellular mobile telephony, of the set of parameters that compose the net. The prediction is crucial when it is to the conception or the project of a system. Local measures of the level of signal and interferences signals in local stations are expensive. Aiming at, then, for to reduce this problem propagation models had been developed with the objective to supply an alternative of low cost and good efficiency so that the signal if keeps inside of desirable characteristics. The characteristics of the channel, inside of this idea, if inserts as the element capable to predict losses of passage, as well as shunting lines of reply of the function impulse of the propagation channel. The path loss is associated with the project of radio base stations, where the analysis of the same one allows knowing how much a transmitter needs to radiate to give an adequate service. The characterization of the channel, on the other hand, objective the allegiance of the received signals, and must in principle supply the form of original wave in the receiver. The objective of this work is the understanding of some models of propagation aiming at to supply an analysis of the characteristics of the signal in specific channels, as much the urban region how much for the dense urban region of the city of Curitiba in the state of the Paraná. For such initially a revision of the main characteristics of the radio channel is presented frequency, as well as of the some models of propagation for environments to the outdoors. After, real levels of signal for these regions are analyzed and simulated for specific program. Finally the comparative of signal levels are traced, aiming at an adjustment of the same ones and then is pointed better amongst the models analyzed and simulated that if adjusted the local conditions of the regional government paranaense, observing the local limitations and impositions.

Keywords: models of propagation, characteristics of the canal, personal mobile communication, methodology of sizing.

SUMÁRIO

FICHA CATALOGRÁFICA.....	III
AGRADECIMENTOS	V
RESUMO	VI
ABSTRACT	VII
LISTA DE TABELAS	XIV
INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO 1 CONCEITOS BÁSICOS	3
1.1 INTRODUÇÃO	3
1.2 PROPAGAÇÃO: MECANISMOS E EFEITOS	5
1.2.1 MECANISMOS BÁSICOS	6
1.2.1.1 PROPAGAÇÃO EM ESPAÇO LIVRE.....	8
1.2.1.2 REFLEXÃO SOBRE TERRA PLANA.....	9
1.2.1.3 DIFRAÇÃO EM OBSTÁCULOS.....	17
1.2.1.3.1 PRINCÍPIO DE HUYGENS.....	17
1.2.1.3.2 ZONAS E ELIPSÓIDES DE FRESNEL	18
1.2.1.3.3 DIFRAÇÃO POR GUME DE FACA	21
1.2.2 EFEITOS DA ATMOSFERA.....	24
1.3 O SINAL NO CANAL RÁDIO-MÓVEL.....	24
1.4 CONCLUSÃO.....	26
1.5 REFERÊNCIAS.....	27
CAPÍTULO 2 MODELOS DE PROPAGAÇÃO	28
2.1 INTRODUÇÃO	28
2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS MODELOS DE PROPAGAÇÃO	29
2.3 CLASSIFICAÇÃO DE AMBIENTES.....	30
2.3.1 MORFOLOGIA NOS MODELOS DE PROPAGAÇÃO	30
2.4 EXAME DOS MODELOS DE PROPAGAÇÃO	31
2.4.1 MODELO DE OKUMURA	31
2.4.2 MODELO DE HATA	32
2.4.3 MODELO COST-231 Walfish-Ikegami	33
2.4.4 MODELO DE LEE	37
2.4.4.1 ATENUAÇÃO DE PROPAGAÇÃO ÁREA A ÁREA	39
2.4.4.2 FATOR DE AJUSTE DA FREQUÊNCIA (A_f).....	40
2.4.4.3 GANHO ASSOCIADO À ALTURA EFETIVA DA ANTENA (G_{effh}).....	41
2.4.4.4 FATOR DE AJUSTE (α).....	42
2.4.4.5 PERDAS POR DIFRAÇÃO NO TERRENO (L)	43
2.4.5 MODELO DE ERCEG	44
2.5 INTEGRAÇÃO DOS MODELOS COM MEDIDAS REAIS	46

2.6	CONCLUSÃO.....	47
2.7	REFERÊNCIAS.....	47
CAPÍTULO 3 METODOLOGIA PARA DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS DE PROPAGAÇÃO.....50		
3.1	INTRODUÇÃO	50
3.2	FLUXOGRAMA.....	51
3.3	BASE DE DADOS	54
3.4	DIMENSIONAMENTO DO ESTUDO	60
3.4.1	INSERÇÃO DAS ESTAÇÕES TRANSMISSORAS	60
3.4.2	MODELOS DE PROPAGAÇÃO	62
3.4.2.1	Modelo I.....	63
3.4.2.2	Modelo II.....	64
3.4.2.3	Modelo IV.....	66
3.5	FILTRAGEM.....	68
3.6	INSERÇÃO E PROCESSAMENTO DE MEDIDAS.....	69
3.7	CALIBRAÇÃO	83
3.8	PROCESSAMENTO COM OS PARÂMETROS CALIBRADOS.....	86
3.9	CONCLUSÃO.....	90
3.10	REFERÊNCIAS.....	91
CAPÍTULO 4 ANÁLISE DE RESULTADOS92		
4.1	INTRODUÇÃO	92
4.2	AVALIAÇÃO DOS TRÊS MODELOS	93
4.3	AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DOS FATORES DE CORREÇÃO	106
4.4	AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE PROPAGAÇÃO	121
4.5	CONCLUSÃO.....	136
CAPÍTULO 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS137		
REFERÊNCIA GERAL.....139		

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1-1 – REFLEXÃO SOBRE TERRA PLANA	10
FIGURA 1-2 – REFLEXÃO EM SUPERFÍCIE RUGOSA (ESPALHAMENTO).....	15
FIGURA 1-3 – DETERMINAÇÃO DA DIFERENÇA DE FASE ENTRE RAIOS REFLETIDOS EM SUPERFÍCIE RUGOSA	15
FIGURA 1-4 – OBSTRUÇÃO DA ONDA PROPAGANTE POR UM OBSTÁCULO	17
FIGURA 1-5 – DISTÂNCIA ENTRE PONTOS DA FRENTE DE ONDA E UM OBSERVADOR	18
FIGURA 1-6 – GEOMETRIA PARA CÁLCULO DE DEFASAGEM ENTRE RAIOS (DETERMINAÇÃO DE ZONAS DE FRESNEL)	19
FIGURA 1-7 – ELIPSÓIDE DE FRESNEL	21
FIGURA 1-8 – GEOMETRIA DA DIFRAÇÃO POR GUME DE FACA	22
FIGURA 1-9 – SINAL TÍPICO DE COMUNICAÇÕES MÓVEIS CELULARES	25
FIGURA 2-1 – PARÂMETROS PARA EQUAÇÕES DO MODELO COST 231 WALFISCH – IKEGAMI	34
FIGURA 2-2 – VALORES DE DECAIMENTO E PONTO DE INTERSEÇÃO DERIVADOS DE MEDIDAS REAIS.....	40
FIGURA 2-3 – DETERMINAÇÃO DO PONTO ESPECULAR E ALTURA EFETIVA PARA $GEHF < 0$	42
FIGURA 2-4 – DETERMINAÇÃO DO PONTO ESPECULAR E ALTURA EFETIVA PARA $GEHF > 0$	42
FIGURA 2-5 – DIAGRAMA DOS PARÂMETROS DE N PARA PERDA POR DIFRAÇÃO NO TERRENO COM $HP < 0$ E $HP > 0$	44
FIGURA 3-1 – FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA PROPOSTA.....	52
FIGURA 3-2 – FLUXOGRAMA DO BLOCO DE PROCESSAMENTO DE MEDIDAS USANDO PARÂMETROS GERAIS DOS MODELOS	53
FIGURA 3-3 – FLUXOGRAMA DO BLOCO DE PROCESSAMENTO DE MEDIDAS USANDO PARÂMETROS CALIBRADOS DOS MODELOS	54
FIGURA 3-4 – ROTA USADA NA REGIÃO CENTRAL DE CURITIBA	55
FIGURA 3-5 – TOPOGRAFIA DAS MEDIDAS	55
FIGURA 3-6 – MORFOLOGIA DO TERRENO	56
FIGURA 3-7 – ESTAÇÃO TRANSMISSORA PLOTADA NO CENTRO DE CURITIBA.....	61
FIGURA 3-8 – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DA ESTAÇÃO TRANSMISSORA	62
FIGURA 3-9 – MODELO I DE PREDIÇÃO E SEUS RESPECTIVOS PARÂMETROS.....	64
FIGURA 3-10 - MODELO II DE PREDIÇÃO E SEUS RESPECTIVOS PARÂMETROS	66
FIGURA 3-11 – MODELO IV DE PREDIÇÃO E SEUS RESPECTIVOS PARÂMETROS	67

FIGURA 3-12 FILTRAGEM DOS DADOS MEDIDO.....	69
FIGURA 3-13 - VALORES MEDIDOS FILTRADOS.....	70
FIGURA 3-14 – PROCESSAMENTO DAS MEDIDAS DE UMA ESTAÇÃO UTILIZANDO O MODELO I.	71
FIGURA 3-15 – PROCESSAMENTO DAS MEDIDAS DE UMA ESTAÇÃO UTILIZANDO O MODELO II.	72
FIGURA 3-16 – PROCESSAMENTO DAS MEDIDAS DE UMA ESTAÇÃO UTILIZANDO O MODELO IV.	73
FIGURA 3-17 – FATORES DE AJUSTE E DADOS ESTATÍSTICOS DE PREDIÇÃO UTILIZANDO O MODELO I.....	74
FIGURA 3-18 – FATORES DE AJUSTE E DADOS ESTATÍSTICOS DE PREDIÇÃO UTILIZANDO O MODELO II.....	75
FIGURA 3-19 – FATORES DE AJUSTE E DADOS ESTATÍSTICOS DE PREDIÇÃO UTILIZANDO O MODELO IV.....	76
FIGURA 3-20 – NÍVEL DE SINAL [dBm] POR PONTOS MEDIDOS UTILIZANDO O MODELO I.....	77
FIGURA 3-21 – NÍVEL DE SINAL [dBm] POR PONTOS MEDIDOS UTILIZANDO O MODELO II.....	78
FIGURA 3-22 – NÍVEL DE SINAL [dBm] POR PONTOS MEDIDOS UTILIZANDO O MODELO IV.....	79
FIGURA 3-23 - CALIBRAÇÃO UTILIZANDO-SE O MODELO DE PROPAGAÇÃO I.....	84
FIGURA 3-24 - CALIBRAÇÃO UTILIZANDO-SE O MODELO DE PROPAGAÇÃO II.....	85
FIGURA 3-25 - CALIBRAÇÃO UTILIZANDO-SE O MODELO DE PROPAGAÇÃO IV.....	86
FIGURA 4-1 – COMPARAÇÃO DO DESVIO PADRÃO ENTRE OS MODELOS UTILIZANDO OS PARÂMETROS GERAIS SEM PARÂMETROS DE CORREÇÃO.....	94
FIGURA 4-2 – COMPARAÇÃO DO DESVIO MÉDIO ENTRE OS MODELOS UTILIZANDO OS PARÂMETROS GERAIS SEM PARÂMETROS DE CORREÇÃO.....	96
FIGURA 4-3 – COMPARAÇÃO DO DESVIO PADRÃO ENTRE OS MODELOS UTILIZANDO OS PARÂMETROS GERAIS COM PARÂMETROS DE CORREÇÃO.....	97
FIGURA 4-4 – COMPARAÇÃO DO DESVIO MÉDIO ENTRE OS MODELOS UTILIZANDO OS PARÂMETROS GERAIS COM PARÂMETROS DE CORREÇÃO.....	99
FIGURA 4-5 – COMPARAÇÃO DO DESVIO PADRÃO ENTRE OS MODELOS UTILIZANDO OS PARÂMETROS CALIBRADOS SEM PARÂMETROS DE CORREÇÃO.....	100
FIGURA 4-6 – COMPARAÇÃO DO DESVIO MÉDIO ENTRE OS MODELOS UTILIZANDO OS PARÂMETROS CALIBRADOS SEM PARÂMETROS DE CORREÇÃO.....	102

FIGURA 4-7 – COMPARAÇÃO DO DESVIO PADRÃO ENTRE OS MODELOS UTILIZANDO OS PARÂMETROS CALIBRADOS COM PARÂMETROS DE CORREÇÃO.	103
FIGURA 4-8 – COMPARAÇÃO DO DESVIO MÉDIO ENTRE OS MODELOS UTILIZANDO OS PARÂMETROS CALIBRADOS COM PARÂMETROS DE CORREÇÃO.	105
FIGURA 4-9 – COMPARAÇÃO, UTILIZANDO OU NÃO FATORES DE CORREÇÃO, DO DESVIO PADRÃO PARA O MODELO I UTILIZANDO OS PARÂMETROS GERAIS DO MODELO.	107
FIGURA 4-10 – COMPARAÇÃO, UTILIZANDO OU NÃO FATORES DE CORREÇÃO, DO DESVIO MÉDIO PARA O MODELO I UTILIZANDO OS PARÂMETROS GERAIS DO MODELO.	108
FIGURA 4-11 – COMPARAÇÃO, UTILIZANDO OU NÃO FATORES DE CORREÇÃO, DO DESVIO PADRÃO PARA O MODELO II UTILIZANDO OS PARÂMETROS GERAIS DO MODELO.	109
FIGURA 4-12 – COMPARAÇÃO, UTILIZANDO OU NÃO FATORES DE CORREÇÃO, DO DESVIO MÉDIO PARA O MODELO II UTILIZANDO OS PARÂMETROS GERAIS DO MODELO.	110
FIGURA 4-13 – COMPARAÇÃO, UTILIZANDO OU NÃO FATORES DE CORREÇÃO, DO DESVIO PADRÃO PARA O MODELO IV UTILIZANDO OS PARÂMETROS GERAIS DO MODELO.	111
FIGURA 4-14 – COMPARAÇÃO, UTILIZANDO OU NÃO FATORES DE CORREÇÃO, DO DESVIO MÉDIO PARA O MODELO IV UTILIZANDO OS PARÂMETROS GERAIS DO MODELO.	113
FIGURA 4-15 – COMPARAÇÃO, UTILIZANDO OU NÃO FATORES DE CORREÇÃO, DO DESVIO PADRÃO PARA O MODELO I UTILIZANDO OS PARÂMETROS CALIBRADOS DO MODELO.	114
FIGURA 4-16 – COMPARAÇÃO, UTILIZANDO OU NÃO FATORES DE CORREÇÃO, DO DESVIO MÉDIO PARA O MODELO I UTILIZANDO OS PARÂMETROS CALIBRADOS DO MODELO.	115
FIGURA 4-17 – COMPARAÇÃO, UTILIZANDO OU NÃO FATORES DE CORREÇÃO, DO DESVIO PADRÃO PARA O MODELO II UTILIZANDO OS PARÂMETROS CALIBRADOS DO MODELO.	117
FIGURA 4-18 – COMPARAÇÃO, UTILIZANDO OU NÃO FATORES DE CORREÇÃO, DO DESVIO MÉDIO PARA O MODELO II UTILIZANDO OS PARÂMETROS CALIBRADOS DO MODELO.	118
FIGURA 4-19 – COMPARAÇÃO, UTILIZANDO OU NÃO FATORES DE CORREÇÃO, DO DESVIO PADRÃO PARA O MODELO IV UTILIZANDO OS PARÂMETROS CALIBRADOS DO MODELO.	119
FIGURA 4-20 – COMPARAÇÃO, UTILIZANDO OU NÃO FATORES DE CORREÇÃO, DO DESVIO MÉDIO PARA O MODELO IV UTILIZANDO OS PARÂMETROS CALIBRADOS DO MODELO.	120
FIGURA 4-21 – COMPARAÇÃO DO DESVIO PADRÃO PARA O MODELO I ENTRE OS PARÂMETROS GERAIS E CALIBRADOS, SEM O USO DOS FATORES DE CORREÇÃO.	122
FIGURA 4-22 – COMPARAÇÃO DO DESVIO MÉDIO PARA O MODELO I ENTRE OS PARÂMETROS GERAIS E CALIBRADOS, SEM O USO DOS FATORES DE CORREÇÃO.	123

FIGURA 4-23 – COMPARAÇÃO DO DESVIO PADRÃO PARA O MODELO II ENTRE OS PARÂMETROS GERAIS E CALIBRADOS, SEM O USO DOS FATORES DE CORREÇÃO.	124
FIGURA 4-24 – COMPARAÇÃO DO DESVIO MÉDIO PARA O MODELO II ENTRE OS PARÂMETROS GERAIS E CALIBRADOS, SEM O USO DOS FATORES DE CORREÇÃO.	125
FIGURA 4-25 – COMPARAÇÃO DO DESVIO PADRÃO PARA O MODELO IV ENTRE OS PARÂMETROS GERAIS E CALIBRADOS, SEM O USO DOS FATORES DE CORREÇÃO.	126
FIGURA 4-26 – COMPARAÇÃO DO DESVIO MÉDIO PARA O MODELO IV ENTRE OS PARÂMETROS GERAIS E CALIBRADOS, SEM O USO DOS FATORES DE CORREÇÃO.	128
FIGURA 4-27 – COMPARAÇÃO DO DESVIO PADRÃO PARA O MODELO I ENTRE OS PARÂMETROS GERAIS E CALIBRADOS, COM O USO DOS FATORES DE CORREÇÃO.	129
FIGURA 4-28 – COMPARAÇÃO DO DESVIO MÉDIO PARA O MODELO I ENTRE OS PARÂMETROS GERAIS E CALIBRADOS, COM O USO DOS FATORES DE CORREÇÃO.	130
FIGURA 4-29 – COMPARAÇÃO DO DESVIO PADRÃO PARA O MODELO II ENTRE OS PARÂMETROS GERAIS E CALIBRADOS, COM O USO DOS FATORES DE CORREÇÃO.	132
FIGURA 4-30 – COMPARAÇÃO DO DESVIO MÉDIO PARA O MODELO II ENTRE OS PARÂMETROS GERAIS E CALIBRADOS, COM O USO DOS FATORES DE CORREÇÃO.	133
FIGURA 4-31 – COMPARAÇÃO DO DESVIO PADRÃO PARA O MODELO IV ENTRE OS PARÂMETROS GERAIS E CALIBRADOS, COM O USO DOS FATORES DE CORREÇÃO.	134
FIGURA 4-32 – COMPARAÇÃO DO DESVIO MÉDIO PARA O MODELO IV ENTRE OS PARÂMETROS GERAIS E CALIBRADOS, COM O USO DOS FATORES DE CORREÇÃO.	135

LISTA DE TABELAS

TABELA 1- 1 – ASPECTOS GERAIS DE RÁDIO-PROPAGAÇÃO	4
TABELA 1-2 – ALGUNS VALORES TÍPICOS DE σ E ϵR	12
TABELA 2-1 – VALORES DE DECAIMENTO E PONTO DE INTERSEÇÃO DERIVADOS DE MEDIDAS REAIS.....	39
TABELA 2-2 – FATOR DE AJUSTE DAS FREQUÊNCIAS (Af).....	40
TABELA 2-3 – PARÂMETROS DO MODELO DE ERCEG.....	46
TABELA 3-1 – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS GERAIS DAS ESTAÇÕES	57
TABELA 3-2 – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO SISTEMA IRRADIANTE DAS ESTAÇÕES.....	58
TABELA 3-3 - CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO SISTEMA DE POTÊNCIA DAS ESTAÇÕES.....	59
TABELA 3-4 – PARÂMETROS GERAIS DOS MODELOS PARA ÁREA URBANA E URBANA Densa DE CURITIBA	68
TABELA 3-5 – VALORES DE DESVIO PADRÃO E DO DESVIO MÉDIO COM E SEM FATORES DE CORREÇÃO PARA O MODELO I -PARÂMETROS GERAIS.	80
TABELA 3-6 – VALORES DE DESVIO PADRÃO E DO DESVIO MÉDIO COM E SEM FATORES DE CORREÇÃO PARA O MODELO II -PARÂMETROS GERAIS.....	81
TABELA 3-7 – VALORES DE DESVIO PADRÃO E DO DESVIO MÉDIO COM E SEM FATORES DE CORREÇÃO PARA O MODELO IV -PARÂMETROS GERAIS.	82
TABELA 3-8 – PARÂMETROS CALIBRADOS DOS MODELOS PARA ÁREA URBANA E URBANA Densa DE CURITIBA	86
TABELA 3-9 – VALORES DE DESVIO PADRÃO E DO DESVIO MÉDIO COM E SEM FATORES DE CORREÇÃO PARA O MODELO I -PARÂMETROS CALIBRADOS.	87
TABELA 3-10 – VALORES DE DESVIO PADRÃO E DO DESVIO MÉDIO COM E SEM FATORES DE CORREÇÃO PARA O MODELO II -PARÂMETROS CALIBRADOS.....	88
TABELA 3-11 – VALORES DE DESVIO PADRÃO E DO DESVIO MÉDIO COM E SEM FATORES DE CORREÇÃO PARA O MODELO IV - PARÂMETROS CALIBRADOS.....	89

INTRODUÇÃO

O sucesso comercial das comunicações celulares, desde sua implantação no início da década de 80, tem despertado o interesse entre os pesquisadores de comunicação sem fio em entender e prever as características do sinal de rádio em propagação nas várias áreas, urbanas e suburbanas. Com o crescimento contínuo das comunicações móveis, é importante para o projetista do sistema determinar uma ótima localização para a estação base, visando à obtenção de cobertura e de taxas de dados adequadas. Portanto, é importante a utilização dos modelos de propagação em comunicações móveis de modo a se obterem parâmetros de projeto a serem utilizados na concepção de sistemas móveis. Dentro das diversas tecnologias e sistemas de comunicação sem fio, a implementação destes modelos deve conter parâmetros que se aproximem ao máximo das características reais do meio em que a estação será inserida fazendo com que as simulações se aproximem ao máximo da realidade. Este trabalho tem então como objetivo a determinação do comportamento do sinal tanto em uma região urbana quanto em uma região urbana densa da cidade de Curitiba – PR, bem como o ajuste dos parâmetros adequados para os modelos de propagação de Lee, de Cost 231 e de Erceg, todos em ambiente externo a edificações. Estes parâmetros podem ser utilizados em regiões de características similares. A faixa de frequência a ser utilizada é a da comunicação móvel pessoal de 1800 MHz, entre estação transmissora e estação móvel. Esta dissertação foi então estruturada da seguinte maneira:

O CAPÍTULO 1 apresenta os conceitos básicos de um canal de rádio propagação, onde é dada ênfase à compreensão do funcionamento de um sistema móvel celular.

O CAPÍTULO 2 apresenta vários modelos de propagação, no entanto é dado ênfase aos modelos de propagação que são aplicados à ambientes abertos, ou seja, fora de edificações. Sendo estes os modelos utilizados nas simulações.

O CAPÍTULO 3 apresenta uma metodologia de definição dos parâmetros de propagação utilizando um estudo de caso real realizado na região urbana e urbana densa da cidade de Curitiba no estado do Paraná, utilizando apenas modelos que operem em ambiente

aberto. As simulações realizadas visam prever o comportamento dos canais de propagação utilizados para comunicação móvel pessoal, bem como possíveis ajustes nos mesmos.

No CAPÍTULO 4, é realizada a análise destas simulações, onde é avaliada a metodologia aplicada e ainda indica parâmetros ideais para a região central da cidade.

Finalmente, o CAPÍTULO 5 apresenta as considerações finais deste trabalho, onde é realizada uma análise sobre os aspectos mais significativos de seu desenvolvimento. Além disso, são apresentadas também as sugestões para trabalhos futuros indicando a continuidade deste dentro da linha de pesquisa do laboratório.

CAPÍTULO 1

CONCEITOS BÁSICOS

Este capítulo tutorial introduz os principais conceitos básicos do canal de propagação de rádio frequência, enfatizando a sua estrutura, arquitetura básica e a faixa de frequências utilizada pelos canais de comunicação rádio móvel.

1.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta a conceituação básica do canal de rádio-propagação, iniciando-se pela descrição de mecanismos e características pertinentes a cada região do espectro de rádio-frequência. Por serem de maior interesse neste trabalho, as características de propagação em ambientes celulares serão exploradas com um maior grau de profundidade.

O canal de rádio-propagação, pela sua natureza aleatória e dependente da faixa de frequências utilizada, não é de fácil compreensão, exigindo estudos teóricos e dados estatísticos para sua caracterização. Existem três formas (modos) básicos de propagação, a partir das quais podem ocorrer subdivisões que são: ondas ionosféricas, ondas troposféricas e ondas terrestres. [1-1]

O modo de maior importância no estudo da rádio propagação em comunicações celulares é o modo das ondas terrestres. Na propagação de onda, a onda direta e a onda refletida no solo representam mecanismos básicos de propagação. Nas situações práticas, o que se encontra é, somada a esses dois mecanismos, a ocorrência de ondas espalhadas, difratadas e, dependendo do ambiente, ondas transmitidas através de obstáculos.

Dependendo da faixa de frequências utilizada, do ambiente e das distâncias envolvidas, haverá predomínio de um ou alguns mecanismos sobre os demais. A TABELA 1-1 apresenta um sumário das faixas de frequência rádio, suas características (mecanismos de propagação envolvidos) e aplicações. [1-1]

TABELA 1- 1 – Aspectos Gerais de Rádio-Propagação

Freqüências	Mecanismos de propagação	Efeitos da atmosfera e do terreno	Aspectos de sistema	Tipos de serviço
ELF (30 - 300 Hz)	Onda "guiada" entre a ionosfera e a superfície da Terra e refratada até grandes profundidades no solo e no mar	Atenuação em 100 Hz entre 0,003 e 0,03dB/km sobre o solo e de 0,3 dB/km sobre a água do mar	Antenas (cabos aterrados) gigantescas; taxas de transmissão baixa (1bps)	Comunicação com submarinos, minas subterrâneas; sensoriamento remoto do solo.
VLf (3 - 30 kHz)	Onda "guiada" entre a camada D da ionosfera e a superfície da Terra e refratada no solo e no mar	Baixas atenuações sobre o solo e no mar	Antenas de tamanho viável têm ganho e diretividade muito baixos; taxas de transmissão muito baixas	Telegrafia para navios com alcance mundial; serviços de navegação;
LF (30 - 300 kHz)	Onda "guiada" entre a camada D da ionosfera e a superfície da Terra até 100 kHz, com a onda ionosférica tornando-se distinta acima desta freqüência.	Desvanecimento em distâncias curtas devido à interferência entre a onda ionosférica e a de superfície.	Antenas de tamanho viável com ganho e diretividade baixos; taxas de transmissão baixas.	Comunicação de longa distância com navios; rádio-difusão e serviços de navegação.
MF (300 - 3000 kHz)	Onda de superfície a curta distância e em freqüências baixas e onda ionosférica a longa distância.	Atenuação da onda de superfície reduz sua cobertura a 100 km; onda ionosférica forte à noite.	Possibilidade de uso de antenas de 1/4 de onda e antenas diretivas com múltiplos elementos	Rádio-difusão, rádio-navegação e alguns serviços móveis.
HF (3 - 30 MHz)	Onda ionosférica; onda de superfície a distâncias curtas.	Comunicação dependente do comportamento da ionosfera; onda de superfície atenuada.	Uso de antenas log-periódicas e conjuntos horizontais de dipolos; sistemas de poucos canais.	Fixo ponto-a-ponto; móvel terrestre, marítimo e aeronáutico; rádio-difusão.
VHF (30 - 300 MHz)	Propagação em visibilidade; difração; tropodifusão. (ondas espaciais)	Efeitos de refração; multipercursos; difração pelo relevo; espalhamento troposférico.	Antenas Yagi (dipolos múltiplos) e helicoidais; sistemas de baixa e média capacidade.	Fixo terrestre; móvel terrestre e por satélite; rádio-difusão; rádio-farol.

Frequências	Mecanismos de propagação	Efeitos da atmosfera e do terreno	Aspectos de sistema	Tipos de serviço
UHF (300 - 3000 MHz)	Propagação em visibilidade; difração; tropodifusão. (ondas espaciais)	Efeitos de refração; multipercursos e dutos (faixa alta); difração e obstrução pelo relevo.	Antenas Yagi (dipolos múltiplos), helicoidais e de abertura; sistemas de média e alta capacidade.	Fixo terrestre; radar móvel terrestre e por satélite; rádio-difusão e TV; celular e PCS (<i>Personal Communication Systems</i>)
SHF (3 - 30 GHz)	Propagação em visibilidade.	Desvanecimento por multipercursos; atenuação por chuvas (acima de 10 GHz); obstrução pelo terreno.	Antenas de abertura; sistemas de alta capacidade.	Fixo terrestre e por satélite; móvel terrestre e por satélite; sensoriamento remoto; radar.
EHF (30 - 300 GHz)	Propagação em visibilidade.	Desvanecimento por multipercursos; atenuação por chuvas; absorção por gases; obstrução por edificações.	Antenas de abertura; sistemas de alta capacidade.	Rádio acesso fixo e móvel; sistemas por satélite; sensoriamento remoto.

1.2 PROPAGAÇÃO: MECANISMOS E EFEITOS

Os mecanismos de propagação determinam a atenuação de propagação no enlace e, conseqüentemente, o valor médio do sinal no receptor. A compreensão dos mecanismos envolvidos é básica para o cálculo do raio máximo de uma célula. Por outro lado, os efeitos de propagação determinam as flutuações rápidas e lentas do sinal em torno de seu valor médio.

As flutuações que reduzem o valor do sinal são o que se denomina *desvanecimento* (em pequena escala ou, usualmente, desvanecimento rápido; e em larga escala ou, usualmente, desvanecimento lento). O correto entendimento das características dos efeitos de propagação é básico para a estimativa do desempenho do sistema e cálculo de cobertura das células.

Os mecanismos de propagação predominantes na faixa de frequências usada em sistemas celulares são: *visibilidade*, *reflexão* (incluindo múltiplas reflexões e *espalhamento*) e

difração (incluindo múltiplas difrações). É usual se denominar a reflexão especular de reflexão apenas, e a reflexão difusa de espalhamento.

No efeito de propagação denominado *multipercorso*, o sinal resultante recebido é devido à composição de inúmeras versões do sinal original transmitido, que percorreram diferentes percursos determinados, em grande parte, pelas reflexões e difrações que sofreram pelos próprios mecanismos de propagação. Outro efeito de propagação é o que se manifesta através da flutuação do nível de sinal devido a obstruções geradas pelo relevo ou criadas pelo homem. Esse efeito é conhecido por *sombreamento*.

Quando do projeto de um sistema de comunicações, a determinação exata tanto das características de propagação quanto dos mecanismos e de seus efeitos são muito importantes.

1.2.1 MECANISMOS BÁSICOS

Serão descritos a seguir alguns mecanismos importantes para a compreensão da rádio-propagação, especialmente em comunicações móveis. Antes, porém, serão apresentados alguns conceitos básicos.

O Ganho máximo de uma antena é fornecido pela equação:

$$G_M = \frac{\text{densidade de potência na direção de máxima irradiação}}{\text{densidade de potência irradiada isotropicamente}} \quad (1.1)$$

O termo “isotropicamente” é utilizado para definir a irradiação uniforme de energia em todas as direções. Conhecendo-se P_T (potência de transmissão) e G_T (ganho máximo da antena transmissora), é possível se determinar a densidade de potência a qualquer distância do transmissor.

A Área efetiva de recepção de uma antena é dada pela expressão:

$$A_e = \frac{\lambda^2 G_R}{4\pi} \quad (1.2)$$

Onde:

$\lambda = 3 \times 10^8$ [m/s] / f [Hz] - comprimento de onda

f - frequência [Hz];

G_R - ganho máximo da antena receptora.

Conhecendo-se a densidade de potência na recepção, a potência recebida é determinada através do produto entre a densidade de potência e a área efetiva de recepção da antena.

A relação entre o valor RMS da densidade de potência e o campo elétrico recebido é estabelecida pela equação (1.3) em campo distante, isto é distante da estação.

$$s = \frac{E^2}{\eta} \quad (1.3)$$

Onde:

s - densidade de potência [W/m^2];

E - módulo do campo elétrico [V/m];

η - impedância intrínseca do meio [Ω]; no espaço livre: $\eta = \eta_0 = 120\pi \cong 377 \Omega$.

A densidade de potência a uma distância d , para uma antena isotrópica é dada por:

$\frac{P_T}{4\pi d^2}$, onde P_T representa a potência transmitida. Para uma antena de ganho G_T , o ganho

multiplica a expressão de densidade de potência, gerando a equação:

$$s = \frac{P_T G_T}{4\pi d^2} \quad (1.4)$$

Igualando-se as expressões (1.3) e (1.4), chega-se na expressão no espaço livre:

$$\frac{E^2}{120\pi} = \frac{P_T G_T}{4\pi d^2}$$

$$E = \frac{\sqrt{30 P_T G_T}}{d} \quad [\text{V}/\text{m}] \quad (1.5)$$

A potência recebida será a densidade de potência multiplicada pela área efetiva da antena. Logo:

$$P_R = s A_e = \frac{E^2}{120\pi} \frac{\lambda^2 G_R}{4\pi}$$

$$P_R = \left(\frac{E \lambda}{2\pi} \right)^2 \frac{G_R}{120} \quad [\text{W}] \quad (1.6)$$

Serão agora apresentados os mecanismos de propagação envolvidos nas comunicações celulares.

1.2.1.1 PROPAGAÇÃO EM ESPAÇO LIVRE

Essa é a situação básica de propagação, segundo a qual transmissor e receptor estão imersos em um espaço livre de obstruções e de reflexões em qualquer direção e o campo elétrico é calculado em um ponto qualquer de observação, ponto este representado pela estação receptora. O mecanismo de propagação envolvido é o de propagação em visibilidade. Embora a propagação em espaço livre seja uma situação bastante particular, o seu entendimento e cálculo é útil para o entendimento da propagação em diferentes ambientes e para diferentes sistemas (como os celulares).

A atenuação do sinal de rádio propagação é determinada pela relação entre a potência recebida e a potência transmitida. Inicialmente, calcula-se a propagação entre antenas isotrópicas (irradiação uniforme em todas as direções) e, posteriormente serão avaliadas outras antenas, inserido-se o ganho destas.

A densidade de potência calculada a uma distância d do transmissor isotrópico é dada pela expressão (1.4), onde o ganho G_T é igual à unidade. A potência recebida é calculada da forma já mostrada no desenvolvimento da expressão (1.6). No cálculo da área efetiva de recepção, o ganho G_R é também igual à unidade. Logo, a expressão (1.7) representa a relação da potência recebida pela transmitida.

$$\frac{P_R}{P_T} = \frac{sA_e}{P_T} = \frac{P_T \lambda^2}{4\pi d^2 4\pi} = \frac{\lambda^2}{4^2 \pi^2 d^2}$$
$$\frac{P_R}{P_T} = \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (1.7)$$

Fazendo-se a relação logarítmica da equação (1.7) tem-se a equação que expressa a atenuação do sinal no espaço livre em decibéis:

$$L_o[dB] = -147,56 + 20 \log(d[m]) + 20 \log(f[Hz]) \quad (1.8)$$

Apresentando o resultado em unidades mais convenientes à faixa de frequências utilizada nos sistemas de comunicação pessoal e às dimensões usuais das células, para sistemas celulares tem-se:

$$L_o[dB] = 92,44 + 20 \log(d[km]) + 20 \log(f[GHz]) \quad (1.9)$$

Essa é, portanto, a atenuação de propagação considerando-se as antenas transmissora e receptora isotrópica (irradiação igual em todas as direções), chamada atenuação (ou perda) básica de transmissão em espaço livre. Quando se considera os ganhos das antenas tem-se:

$$\frac{P_R}{P_T} = \frac{P_T G_T \frac{\lambda^2 G_R}{4\pi d^2}}{P_T} = \frac{\lambda^2 G_T G_R}{4\pi^2 d^2}$$

$$\frac{P_R}{P_T} = \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 G_T G_R \quad (1.10)$$

A expressão (1.10) é denominada Fórmula de Friis. Calculando-se esta expressão em decibéis, obtém-se a atenuação em espaço livre. [1-1], [1-2]

$$L[dB] = 92,44 + 20 \log(d[km]) + 20 \log(f[GHz]) - G_T [dBi] - G_R [dBi] \quad (1.11)$$

Onde:

dBi - ganho, em dB, em relação ao ganho da antena isotrópica ; caso se utilize uma antena direcional, a relação é feita com referência a um dipolo , então se tem uma redução de 2,15 dB, devido ao ganho da antena dipolo.

1.2.1.2 REFLEXÃO SOBRE TERRA PLANA

Para se chegar a expressões de atenuação de propagação que melhor descrevam as situações reais encontradas têm-se expressões teóricas que retratam os mecanismos considerados. O primeiro procedimento, e o mais intuitivo, é o de se considerar a influência da superfície da terra na propagação.

Durante a propagação do sinal, os raios oriundos da antena transmissora sofrem, em geral, inúmeras reflexões até chegarem à antena receptora. A FIGURA 1-1 ilustra os mecanismos de propagação envolvidos. [1-1]

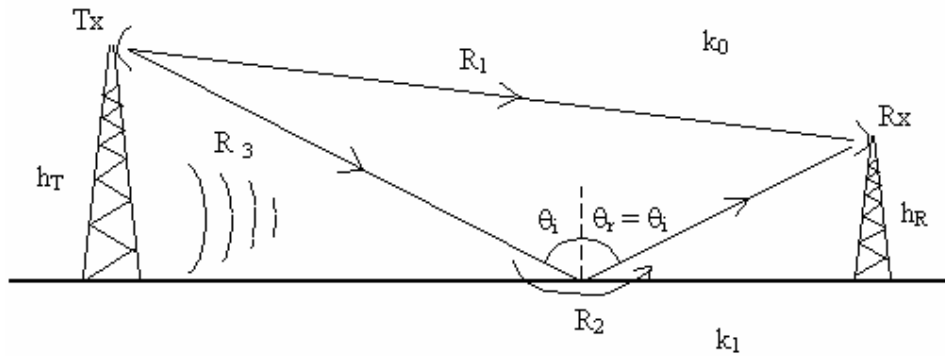


FIGURA 1-1 – Reflexão sobre Terra Plana

Observa-se que chegam três ondas ao receptor:

- Onda do *raio direto* ($R1$), sendo que o ângulo de incidência (θ_i) no plano terra é zero,
- Onda do *raio refletido* em Terra Plana ($R2$), sendo que o ângulo de incidência (θ_i) no plano terra é igual ao ângulo de reflexão (θ_r) e
- *Onda de superfície*, sendo ondas nas quais o ângulo de incidência (θ_i) no plano terra é diferente do ângulo de reflexão (θ_r). Sendo que a terra “funciona” como um condutor.

A onda superficial tende a acompanhar a curvatura da Terra.

É importante ressaltar que essa solução é válida apenas quando a distância horizontal entre transmissor e receptor é muito maior que o comprimento de onda (λ), pois neste caso tem-se um ponto de reflexão no estudo, e quando o índice de refração da Terra (proporcional a k_1 , o número de onda na Terra) é muito maior que o índice de refração no espaço livre (proporcional a k_0 , o número de onda no espaço livre). A solução envolvida no problema será então: [1-1], [1-2]

$$\frac{P_R}{P_T} \cong \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 G_T G_R \left| 1 + \text{Re}^{j\Delta\phi} + (1-R)F(w)e^{j\Delta\phi} \right|^2; d \gg \lambda \text{ e } k_1 \gg k_0 \quad (1.12)$$

1° TERMO + 2° TERMO + 3° TERMO

O primeiro termo da expressão (1.12) é referente ao raio direto, correspondendo à Fórmula de Friis vista na propagação em espaço livre. Esse resultado é esperado, uma vez que na propagação em espaço livre, a onda que chega ao receptor é de um raio direto (propagação sem intervenção de nenhum obstáculo).

O segundo termo da expressão (1.12) é referente ao raio refletido em Terra Plana. O coeficiente de reflexão (R) é dependente do ângulo de incidência θ_i e da relação entre k_l e k_0 ; e a fase $\Delta\varphi$ é proporcional à diferença de percurso entre o raio direto e o raio refletido.

O coeficiente de reflexão no solo, R , é dado então pelas expressões:

$$R_V(\theta_i) = \frac{\varepsilon_{efr} \cos(\theta_i) - \sqrt{\varepsilon_{efr} - \text{sen}^2(\theta_i)}}{\varepsilon_{efr} \cos(\theta_i) + \sqrt{\varepsilon_{efr} - \text{sen}^2(\theta_i)}} \quad (1.13)$$

$$R_H(\theta_i) = \frac{\cos(\theta_i) - \sqrt{\varepsilon_{efr} - \text{sen}^2(\theta_i)}}{\cos(\theta_i) + \sqrt{\varepsilon_{efr} - \text{sen}^2(\theta_i)}} \quad (1.14)$$

Onde:

Os índices V e H referem-se às componentes do campo elétrico incidente em relação ao plano de incidência. O plano de incidência é o plano formado pelo raio incidente e a normal à superfície de reflexão (nesse caso Terra Plana) no ponto de incidência;

R_V é o coeficiente de reflexão de Fresnel, para a componente vertical (também denominado componente *hard*);

R_H é o coeficiente de reflexão de Fresnel, para a componente horizontal (também denominado componente *soft*);

A permissividade elétrica complexa (efetiva) relativa à superfície da Terra, válida para um meio isotrópico e linear, também pode ser representada por ε_{efr}^* :

$$\varepsilon_{efr}^* = \frac{\varepsilon - j \frac{\sigma}{\omega}}{\varepsilon_0} \quad (1.15)$$

Onde:

ε - permissividade elétrica da superfície refletora [F/m];

σ - condutividade da superfície refletora [S/m];

$\omega = 2\pi f$ - frequência angular [rad/s];

f - frequência [Hz];

$\varepsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$ - permissividade elétrica no vácuo [F/m];

θ_i - ângulo de incidência formado entre o raio incidente e a normal no ponto de incidência como visto na FIGURA 1-1.

Uma observação a respeito dos coeficientes de reflexão é que, para uma faixa muito grande de valores de θ_i , tem-se:

$R_H(\theta_i) \cong -1$, ou seja, a componente horizontal do campo elétrico refletido mantém o módulo e sofre inversão de 180° na fase, em relação ao campo incidente.

Esse valor só se altera de forma significativa para freqüências muito altas e para locais de baixa condutividade como, por exemplo, a terra. Se θ_i é muito grande, valores próximos a 90° graus com a normal, (incidência rasante), então $R_V \cong R_H \cong -1$, pois, observando-se as expressões (1.13) e (1.14), quando θ_i cresce muito, $\cos(\theta_i)$ tende a zero e R_V e R_H tendem a -1 . Mas, para outros valores de θ_i , o comportamento de R_V difere do comportamento de R_H (R_V não tende a -1 para um ampla faixa de valores de θ_i , como ocorre com R_H).

A TABELA 1-2 apresenta alguns valores de condutividade (σ) e de permissividade elétrica relativa (ϵ_r), para algumas superfícies. [1-2]

TABELA 1-2 – Alguns Valores Típicos de σ e ϵ_r

Superfície	σ [S/m]	ϵ_r
Terra seca (pobre)(pó)	10^{-3}	4 - 7
Terra comum	5×10^{-3}	15
Terra úmida (barro)	2×10^{-2}	25 - 30
Água do mar (salgada)	5	81
Água doce	10^{-2}	81

Finalmente, o terceiro termo da expressão (1.12) representa a onda de superfície. A função $F(w)$ é a função de atenuação da onda de superfície e é ela que define sua intensidade. Essa função diminui de intensidade com o aumento da freqüência e com o afastamento do ponto de observação (recepção) em relação ao transmissor. Na faixa de freqüências tratada (UHF), o efeito da onda de superfície pode ser desprezado, pois devido aos obstáculos, perde sua energia conforme a distância o efeito difrativo diminui.

Então, simplifica-se a expressão (1.12) através da supressão do termo de onda de superfície, consideram-se os coeficientes de reflexão iguais a -1 (o que é válido, como visto, para incidência rasante) e, se a distância d for muito maior que $h_T + h_R$ (soma das alturas da

antena transmissora e receptora, respectivamente), a potência recebida pode ser obtida da seguinte maneira:

1. Obtém-se a diferença de fase $\Delta\phi$ entre raio direto (R_1) e todo o percurso de reflexão (R_2):

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (R_2 - R_1) = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta R \quad (1.16)$$

2. Impõem-se a condição de $d \gg (h_T + h_R)$.

$$\Delta\phi \cong \frac{4\pi h_T h_R}{\lambda d} \quad (1.17)$$

Assumindo-se as condições (1) e (2) e fazendo-se um tratamento algébrico no segundo termo da expressão (1.12), obtém-se:

$$\frac{P_R}{P_T} = 4 \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 G_T G_R \text{sen}^2 \left(\frac{\Delta\phi}{2} \right)$$

(1.18)

Substituindo a expressão (1.17) em (1.18), obtém-se:

$$\frac{P_R}{P_T} \cong 4 \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 G_T G_R \text{sen}^2 \left(\frac{2\pi h_T h_R}{\lambda d} \right) \quad (1.19)$$

A potência recebida será então:

$$P_R \cong 4P_T \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 G_T G_R \text{sen}^2 \left(\frac{2\pi h_T h_R}{\lambda d} \right) \quad (1.20)$$

A expressão (1.20) pode sofrer uma outra simplificação. Se o $\text{sen}(\Delta\phi/2) \cong \Delta\phi/2$. Esta situação ocorre quando a incidência é de tal maneira rasante que a diferença de percurso, e, portanto, de fase, entre o raio direto e o raio refletido é muito pequena. Essa aproximação é válida a partir de determinada distância em relação ao transmissor. E resulta em:

$$\begin{aligned} \text{sen} \left(\frac{\Delta\phi}{2} \right) &\cong \frac{\Delta\phi}{2} \\ \text{sen}^2 \left(\frac{\Delta\phi}{2} \right) &\cong \left(\frac{\Delta\phi}{2} \right)^2 \end{aligned} \quad (1.21)$$

e como, pela expressão (1.17), $\frac{\Delta\phi}{2} \cong \frac{2\pi h_T h_R}{\lambda d}$, pode-se escrever.

$$\text{sen}^2\left(\frac{2\pi h_T h_R}{\lambda d}\right) \cong \left(\frac{2\pi h_T h_R}{\lambda d}\right)^2 \quad (1.22)$$

A equação (1.22) fornece a diferença de fase entre raio direto (R_1) e todo o percurso de reflexão (R_2), sendo $(\Delta\phi)/2$ menor que 0,3 radianos. O resultado da substituição de (1.22) em (1.20), fornece então:

$$\begin{aligned} P_R &\cong 4P_T \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 G_T G_R \text{sen}^2\left(\frac{2\pi h_T h_R}{\lambda d}\right)^2 \\ P_R &\cong P_T \left(\frac{1}{d}\right)^2 G_T G_R \left(\frac{h_T h_R}{d}\right)^2 \\ P_R &\cong P_T G_T G_R \left(\frac{h_T h_R}{d^2}\right)^2 \quad [\text{W}] \end{aligned} \quad (1.23)$$

Essa é a expressão de potência recebida na propagação em Terra Plana. A relação entre a potência recebida e a potência transmitida, em watts é dada por:

$$L = \frac{P_R}{P_T} = G_T G_R \left(\frac{h_T h_R}{d^2}\right)^2 \quad (1.24)$$

Expressa em decibéis, resulta em:

$$L[\text{dB}] = 40 \log(d) [m] - 20 \log(h_T) [m] - 20 \log(h_R) [m] - G_T[\text{dBi}] - G_R[\text{dBi}] \quad (1.25)$$

À distância d a partir da qual é válida a aplicação da equação (1.25) é: [1-2]

$$d = \frac{4h_T h_R}{\lambda} \quad (1.26)$$

A expressão obtida tem aplicação limitada a regiões de relevo relativamente plano e com poucas construções (espaços amplos e abertos, típicos de regiões rurais). A análise da reflexão em Terra Plana acima realizada considera a superfície refletora como sendo lisa. A reflexão é dita especular, e a direção da onda refletida é única e bem definida pelo ângulo entre a onda incidente e a normal à superfície refletora, através da Lei de Snell da reflexão.

Se a superfície refletora não é lisa, a onda refletida não possuirá direção única. O que ocorre é um espalhamento (difusão) da energia incidente, em várias direções, causado pela irregularidade (rugosidade) da superfície refletora. A FIGURA 1-2 ilustra o espalhamento de

uma frente de onda plana (representada pelos raios incidentes paralelos) refletida em uma superfície rugosa.



FIGURA 1-2 – Reflexão em superfície rugosa (espalhamento)

Observa-se na FIGURA 1-2 que, embora a lei de reflexão continue válida (ângulo de incidência igual ao ângulo de reflexão), como a superfície é irregular, haverá inúmeros ângulos de incidência, distribuídos de maneira desordenada, dando origem a inúmeros ângulos de reflexão. Isso constitui o espalhamento da energia. O efeito prático da reflexão assim gerada (reflexão difusa) é que menos energia será acoplada ao receptor. Um critério prático para a avaliação da rugosidade de uma superfície pode ser observado na FIGURA 1-3.[1-1],[1-2]

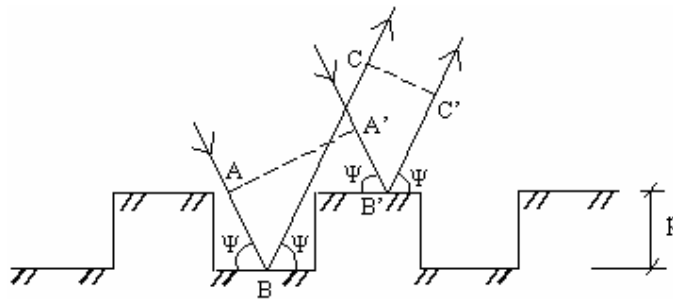


FIGURA 1-3 – Determinação da diferença de fase entre raios refletidos em superfície rugosa

Demonstra-se que a diferença de comprimento entre os dois percursos (Δl), $(AB + BC)$ e $(A'B' + B'C')$ é dada:

$$\Delta l = \frac{p}{\sin \psi} [1 - \cos(2\psi)] = 2p \sin \psi \quad (1.27)$$

Onde, Ψ e o ângulo entre o raio incidente ou refletido com o solo.

A diferença de fase entre os percursos é:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta l = \frac{4\pi p}{\lambda} \text{sen } \psi \quad (1.28)$$

Se $p \ll \lambda$, $\Delta\phi$ é pequeno e se for possível considerar a superfície como sendo lisa. O critério prático, neste caso, consiste em assumir que a superfície é rugosa quando $\Delta\phi \geq \pi/2$, o que leva a :

$$p \geq \frac{\lambda}{8 \text{sen } \psi} \quad (1.29)$$

A expressão (1.29) também é conhecida como Critério de Rayleigh. [1-2]

Ou, se ψ é suficientemente pequeno: $\text{sen } \psi \cong \psi$, que leva o critério a ser expresso por:

$$p \geq \frac{\lambda}{8\psi} . \quad (1.30)$$

A rugosidade é, portanto, determinada pela diferença de fase entre raios que atingem diferentes pontos da superfície (com elevações distintas), conforme ilustra a FIGURA 1-3. Dessa forma, o espalhamento da energia está sendo analisado através da diferença de fase entre raios. Quanto menor a diferença (determinada pela relação entre o desnível p e o comprimento de onda λ), mais lisa é a superfície e menor será o espalhamento por ele causado. O que ocorre na prática é que, pela característica irregular do perfil das rugosidades, o desnível d é tratado como uma variável aleatória e o seu desvio padrão σ_h passa a ser a medido em função da rugosidade da superfície.

Substituindo d por σ_h na expressão (1.28), obtém-se o parâmetro C .

$$C = \frac{4\pi\sigma_h}{\lambda} \text{sen } \psi \quad (1.31)$$

Na expressão (1.31), nota-se que para Ψ pequeno (desprendido da FIGURA 5), o $\text{sen } \Psi = \Psi$, logo:

$$C \cong \frac{4\pi\sigma_h}{\lambda} \psi \quad (1.32)$$

Para um melhor entendimento de C , considere que :

Para $C < 0,1$ a superfície pode ser considerada lisa;

Para $C > 10$ a superfície pode ser considerada muito rugosa, de forma que o espalhamento é tão grande que se pode desconsiderar a componente refletida, pois é desprezível a energia acoplada ao receptor através de reflexão.

Para valores de C entre 0,1 e 10, é definido o coeficiente de espalhamento, obtido empiricamente.

O coeficiente de reflexão especular é então corrigido pelo coeficiente de espalhamento, resultando no coeficiente de reflexão especular a ser usado :

$$|R'| = C_e |R| \quad (1.33)$$

1.2.1.3 DIFRAÇÃO EM OBSTÁCULOS

Para a compreensão do mecanismo da difração em obstáculos, pode ser utilizado o Princípio de Huygens. [1-1], [1-2]

1.2.1.3.1 PRINCÍPIO DE HUYGENS

O Princípio de Huygens estabelece que cada ponto em uma frente de onda funciona como uma fonte de ondas secundárias (elementares), que comporão a frente de onda em uma nova posição ao longo da propagação.

Suponha-se que a frente de onda propagante encontre um obstáculo, como mostrado na FIGURA 1-4.

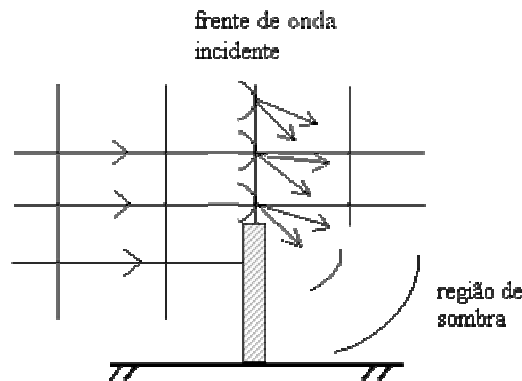


FIGURA 1-4 – Obstrução da onda propagante por um obstáculo

Uma porção da frente de onda será obstruída pelo obstáculo. Através do princípio de Huygens, as fontes pontuais da região não obstruída emitirão frentes de onda secundárias que iluminarão a região situada atrás do obstáculo. Diz-se que a energia foi, então, difratada. A teoria eletromagnética mostra que a onda incidente induz correntes no obstáculo e que o campo irradiado por essas correntes constitui-se no campo difratado.

1.2.1.3.2 ZONAS E ELIPSÓIDES DE FRESNEL

A FIGURA 1-5 mostra que as frentes de onda oriundas de cada irradiador secundário percorrem distâncias distintas até alcançarem o ponto de observação O (pois estão distribuídas ao longo de toda a frente de onda). A análise da defasagem entre os campos associados aos diversos percursos gera o conceito das Zonas de Fresnel. A diferença de fase entre quaisquer dois percursos é dada por $\frac{2\pi}{\lambda} \Delta l$, onde Δl é a diferença de comprimento entre os percursos considerados. Dessa forma, dependendo do caminho percorrido, cada fonte secundária dará uma contribuição positiva ou negativa ao campo recebido em O . [1-1], [1-2]

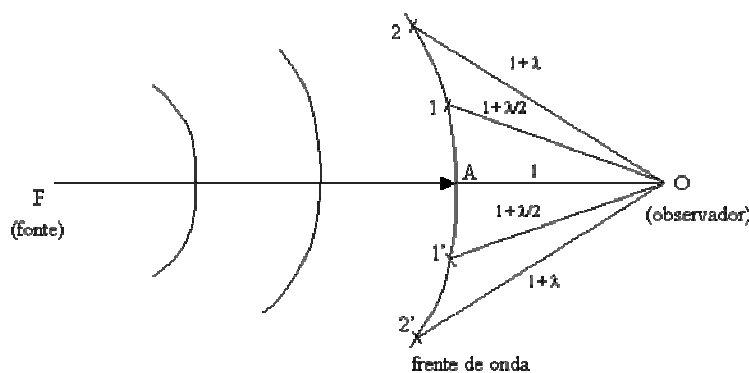


FIGURA 1-5 – Distância entre pontos da frente de onda e um observador

Se a frente de onda da FIGURA 1-5 for substituída por um plano perpendicular ao percurso entre as antenas transmissora e receptora, pode-se fazer um cálculo aproximado da diferença de comprimento e, portanto, de fase, entre o percurso que une o ponto A ao observador O (menor percurso entre um ponto na frente de onda e o ponto de observação) e qualquer outro percurso que chegue a O (oriundo de 1 , $1'$, 2 e $2'$, por exemplo). Essa defasagem (em relação ao percurso perpendicular ao plano) é que será útil no conceito de Zonas de Fresnel. O procedimento de se considerar os percursos como sendo oriundos do plano, bem como os cálculos seguintes, são válidos quando se obedece, na geometria ilustrada na FIGURA 1-6, a $h \ll d_1, d_2$, com $(d_1 + d_2)$ denotando a distância entre transmissor e receptor.

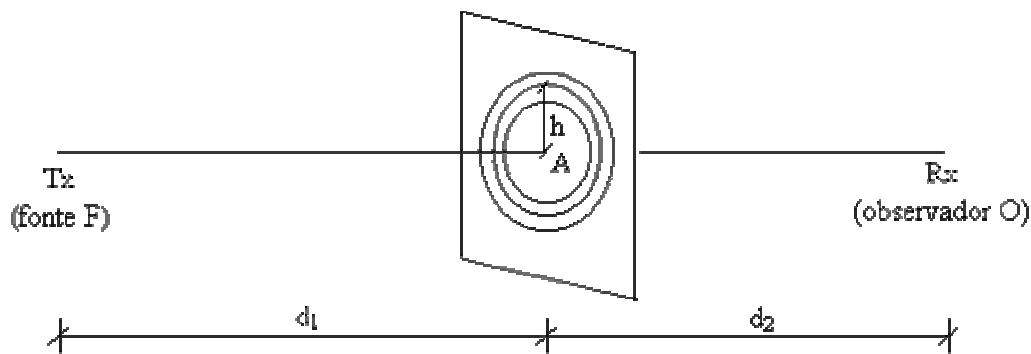


FIGURA 1-6 – Geometria para cálculo de defasagem entre raios (determinação de Zonas de Fresnel)

Na FIGURA 1-6, h é o raio de uma circunferência sobre o plano, centrada no ponto A . A diferença de comprimento entre um percurso que passa por A e um percurso que passa por qualquer outro ponto da circunferência de raio h é:

$$\Delta \cong \frac{h^2}{2} \frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2}, \quad h \ll d_1, d_2 \quad (1.34)$$

A diferença de fase entre os percursos é dada por:

$$\begin{aligned} \Delta\phi &= \frac{2\pi}{\lambda} \Delta = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{h^2}{2} \frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2} \\ \Delta\phi &= \frac{\pi}{2} h^2 \frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2} \end{aligned} \quad (1.35)$$

Denominando $\nu = h \sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2}}$ é obtido:

$$\Delta\phi = \frac{\pi}{2} \nu^2 \quad (1.36)$$

O parâmetro ν é chamado de parâmetro de difração de *Fresnel-Kirchoff*. [1-1]

Na FIGURA 1-5, delimita-se uma porção da frente de onda centrada em A e que descreve um círculo (calota esférica) cujo diâmetro se estende do ponto 1 ao ponto 1'. Em toda essa região criada, os pontos da frente de onda distam de O com um valor compreendido entre l e $l + \lambda/2$, ou seja, a máxima diferença de fase entre percursos que passam por essa região é dada por $\frac{2\pi}{\lambda} \left[\left(1 + \frac{\lambda}{2}\right) - 1 \right] = \pi$.

Sejam os diversos percursos que partem do ponto A com um valor máximo $n \frac{\lambda}{2}$, a primeira região de máximo obtida corresponde a $n = 1$. A próxima região é o anel delimitado pelos pontos 1-1' e 2-2' e, da mesma forma, a máxima defasagem entre pontos situados no anel é de π radianos. Essa região corresponde a $n = 2$, pois a diferença de fase em relação ao percurso que se origina de A está situada entre π e 2π .

As regiões assim formadas, com n a partir de 1, são denominadas Zonas de Fresnel. A primeira zona de Fresnel, por compreender variações de fase de zero a π radianos, gera maiores contribuições que interferem construtivamente para o campo relativo ao percurso que começa em A . Observa-se que as zonas de Fresnel fornecem, alternadamente, contribuições correspondentes a interferências construtivas e destrutivas para o campo total. É possível demonstrar que a área de cada zona é aproximadamente igual, de forma que as contribuições de campo no ponto O , vindas de cada duas zonas adjacentes, tendem a se anular. Porém, como as distâncias entre os pontos pertencentes a cada zona e o ponto de recepção O aumentam progressivamente com o aumento de n , as contribuições das zonas de maior ordem (n maior) tendem a ser menores (agora analisando a amplitude). Então, o que ocorre é que, à medida que se adicionam as contribuições das várias zonas de Fresnel, o campo resultante, inicialmente com oscilações de maior amplitude, tende a oscilar menos até chegar a um valor final. Ainda é interessante observar que, se fosse possível obstruir apenas as zonas de ordem par, ou seja, aquelas que geram contribuições correspondentes a interferências destrutivas para o campo da primeira zona de Fresnel ($n = 1$), o campo recebido seria maior que o de espaço livre, onde não há obstrução.

Se agora forem consideradas outras posições da frente de onda ao longo da propagação entre as antenas, conclui-se que, se forem unidos os limites de cada zona de Fresnel ao longo de toda a propagação, as figuras formadas serão elipsóides (com as antenas transmissora e receptora nos focos), denominados Elipsóides de Fresnel. A FIGURA 1-7 ilustra um elipsóide obtido para um valor de n qualquer. Da mesma forma que as zonas de Fresnel, é utilizada a denominação primeiro elipsóide de Fresnel, segundo elipsóide de Fresnel, e assim por diante, conforme o valor de n . Pela forma como são definidos, conclui-se que qualquer ponto situado na superfície de um elipsóide dista do ponto O de um valor que é $n \frac{\lambda}{2}$ ($n \in$ aos naturais positivos) maior que o percurso oriundo de A . Assim, usando (1.34) obtém-se:

$$\frac{h^2}{2} \frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2} = n \frac{\lambda}{2}$$

$$h^2 = n\lambda \frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2}$$

$$h \cong r_n \cong \sqrt{\frac{n\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \quad (1-37)$$

A expressão (1.37) fornece o raio de um elipsóide de ordem n a uma distância d_1 da fonte, como ilustrado na FIGURA 1-7. [1-1]

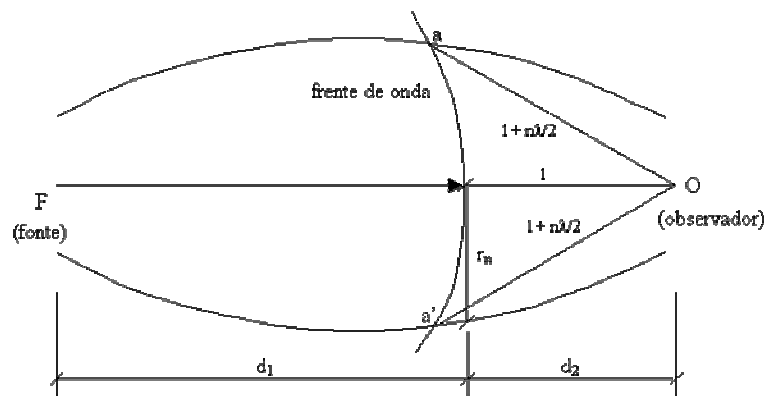


FIGURA 1-7 – Elipsóide de Fresnel

1.2.1.3.3 DIFRAÇÃO POR GUME DE FACA

Apresentados os conceitos importantes na compreensão da difração, a FIGURA 1-8 a seguir ilustra a geometria utilizada para a determinação do campo difratado por um obstáculo gume de faca (obstáculo de espessura infinitesimal e dimensão infinita na direção transversal à propagação, teoricamente). É importante observar que não é considerado o efeito da superfície da terra na determinação da difração.

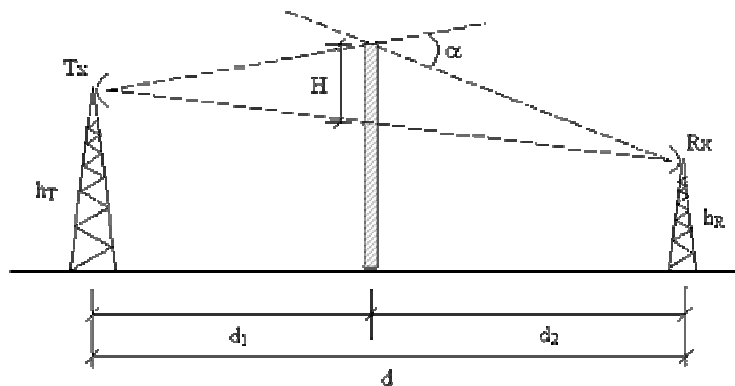


FIGURA 1-8 – Geometria da difração por gume de faca

Alternativamente à expressão (1.34), a diferença de percurso Δ pode ser expressa pela equação: [1-3]

$$\Delta \cong \frac{\alpha^2}{2} \frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2}, \quad h \ll d_1, d_2 \quad (1.38)$$

Onde :

α - como apresentado na FIGURA 1-8 [rad].

A diferença de fase é expressa por:

$$\Delta\phi \cong \frac{\pi\alpha^2}{\lambda} \frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2} \quad (1.39)$$

Lembrando que $\Delta\phi = \frac{\pi}{2} \nu^2$ e usando (1.39), o parâmetro ν (expressões (1.35) e (1.36)) pode ser reescrito em forma de equação: [1-2]

$$\nu \cong \alpha \sqrt{\frac{2d_1 d_2}{\lambda(d_1 + d_2)}}, \quad \alpha < 0,2 \text{ radianos} \quad (1.40)$$

Para o entendimento da perda por difração, considera-se uma *tela plana*, que deve ser perfeitamente absorvente, de dimensão transversal infinita, perpendicular ao percurso direto (linha de visada) entre transmissor e receptora. Enquanto a tela estiver a certa distância da linha de visada que une transmissor e receptor, seu efeito não será sentido no enlace. Na medida em que a tela é aproximada (movendo-se na vertical) da linha de visada, o campo

recebido começará a oscilar, indicando obstrução sucessiva de zonas de Fresnel pares e ímpares.

A difração por gume de faca é obtida através das integrais de Fresnel. A atenuação para a difração por gume de faca é obtida pela expressão: [1-2]

$$L_d[dB] = 6,9 + 20 \log \left[\sqrt{(v - 0,1)^2 + 1} + v - 0,1 \right]; v > -0,7 \quad (1.41)$$

A expressão final de atenuação, incluindo a atenuação de espaço livre (equação 1.8) é, então:

$$L[dB] \cong L_o + L_d = L_o + 6,9 + 20 \log \left[\sqrt{(v - 0,1)^2 + 1} + v - 0,1 \right]; v > -0,7 \quad (1.42)$$

Se o obstáculo tem gume arredondado, existem formulações empíricas para o cálculo da atenuação em excesso à atenuação de gume de faca, baseadas no raio do topo do obstáculo. Para o problema da difração por múltiplos obstáculos, há também desenvolvimentos empíricos. [1-3]

O cálculo da difração (simples ou múltipla) da forma como foi aqui exposto, é utilizado em enlaces ponto-a-ponto, onde se identifica claramente um perfil (montanhoso, por exemplo) onde se possam aplicar as expressões. Não são metodologias de aplicação direta no cálculo de cobertura de sistemas celulares, uma vez que os métodos para previsão da perda de propagação em regiões urbanas já incluem, empiricamente, o efeito de obstrução por edificações. Entretanto, em casos no qual o relevo urbano é muito acidentado, é recomendável adicionar à perda prevista por estes métodos um termo correspondente a uma da atenuação adicional por difração calculada da forma aqui descrita.

A obtenção das três expressões de atenuação apresentadas (propagação em espaço livre, reflexão em Terra Plana e difração por gume de faca) baseou-se em uma descrição muito simplificada do cenário de propagação, permitindo que se chegasse às expressões com um bom grau de exatidão (considerando-se a descrição adotada para o cenário) e com relativa simplicidade. Numa situação real de propagação, a presença de construções e relevo de características aleatórias fará com que o ambiente seja muito diferente do descrito quando da obtenção das expressões (1.11), (1.36) e (1.42). A dificuldade no tratamento teórico de um ambiente complexo (especialmente grandes cidades e ambientes internos) levou ao surgimento de uma variedade de modelos empíricos e semi-empíricos para o cálculo de cobertura.

1.2.2 EFEITOS DA ATMOSFERA

De uma forma geral, a atmosfera exerce uma influência importante na propagação de ondas de rádio. O efeito da chuva pode ser percebido para frequências acima de 8 GHz, aproximadamente, causando atenuação, espalhamento e despolarização da onda propagante. Considerando-se a faixa de frequências utilizada em comunicações móveis celulares, a chuva não apresenta problemas a esses sistemas.[1-3]

Outro efeito atmosférico importante, e que abrange todo o espectro de rádio-frequência, é a refração atmosférica. Pressão atmosférica, temperatura e umidade variam com a altura, provocando variação no índice de refração atmosférica, dependente desses três parâmetros. As consequências da variação do índice de refração podem ser agrupadas em refração – encurvamento na trajetória dos raios, regido pela lei de Snell da refração; espalhamento – devido à formação de porções da atmosfera (“bolhas”) com índice de refração significativamente diferente do índice de refração das vizinhanças; e dutos – condição especial de comportamento do índice de refração, caracterizada pela inversão de seu gradiente entre certas alturas, fazendo com que a propagação da onda possa desviar-se da trajetória desejada (em sistemas ponto-a-ponto) sendo canalizada ao longo daquela região e podendo, inclusive, gerar interferência em sistemas distantes. Embora a refração seja gerada por uma variação uniforme do índice de refração, decrescente com o aumento da altura, e esteja sempre presente na atmosfera, os outros dois fenômenos constituem situações anômalas no comportamento do índice de refração.

As condições anômalas são relevantes na propagação troposférica, afetando especialmente enlaces em microondas de algumas dezenas de quilômetros. Essas condições não são características da propagação terrestre. Porém, a variação temporal do índice de refração pode afetar também a propagação nos sistemas de comunicações móveis celulares. A dinâmica do índice de refração é um dos fatores que contribuem para o desvanecimento em larga escala do sinal, que será analisado adiante. Qualquer outra causa de atenuação devida à atmosfera (gases e neblina, por exemplo) não tem influência relevante nos sistemas celulares, ao menos para as faixas de frequência atualmente utilizadas.

1.3 O SINAL NO CANAL RÁDIO-MÓVEL

O comportamento típico de um sinal de comunicações móveis celulares é como apresentado na FIGURA 1-9. [1-4]

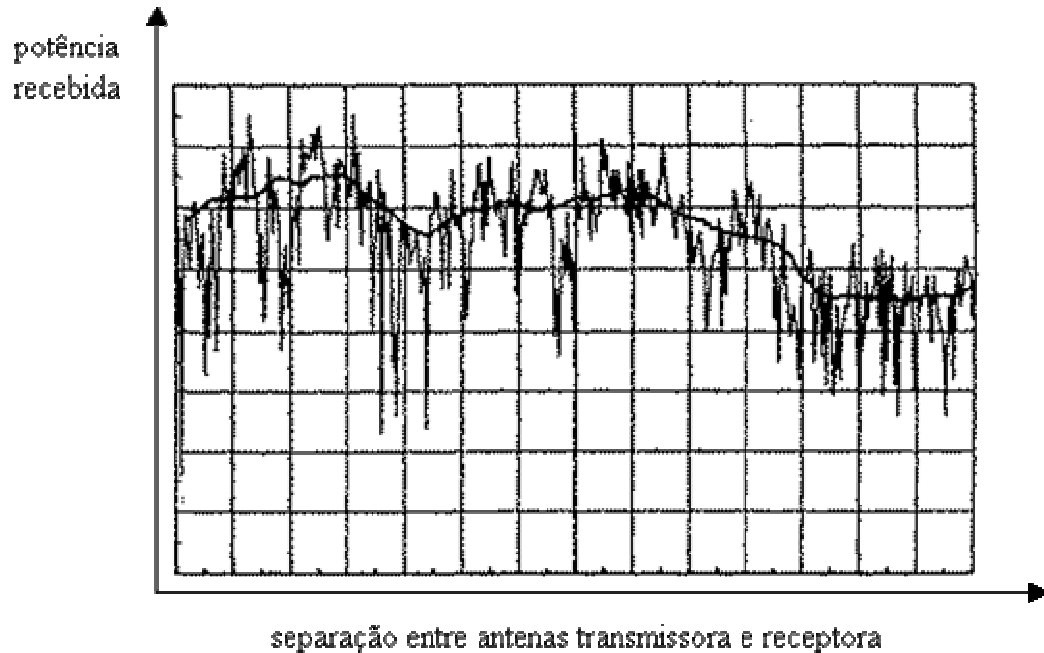


FIGURA 1-9 – Sinal típico de comunicações móveis celulares

Na FIGURA 1-9 é possível distinguir dois comportamentos distintos. As flutuações rápidas do sinal são denominadas *desvanecimento em pequena escala*, associadas ao multipercurso. À variação mais suave e lenta dá-se a denominação de *desvanecimento em larga escala*, associada ao sombreamento por obstáculos. Aliado aos dois comportamentos do sinal há, ainda, naturalmente, a tendência de queda do nível segundo algum expoente de atenuação com a distância, variante conforme o ambiente. Serão agora detalhados os desvanecimentos em larga e pequena escala. Ao tratar do desvanecimento em pequena escala, será apresentado o multipercurso em maiores detalhes por ser este um efeito primordial nas comunicações celulares.

1.4 CONCLUSÃO

Este capítulo apresentou uma descrição dos principais conceitos básicos de rádio propagação visando facilitar o entendimento dos conceitos utilizados pelos modelos de propagação para análise do sinal.

Pode-se notar que foi realizada uma breve caracterização do canal de rádio propagação para aplicação dos conceitos na aplicação das simulações.

Por fim, foi possível verificar alguns dos principais parâmetros que devem ser determinados para permitir o dimensionamento que caracterizam um canal de rádio propagação. A seguir então, considerando-se a teoria apresentada neste capítulo serão introduzidos no capítulo 2 os modelos de propagação.

1.5 REFERÊNCIAS

- [1-1] – SILVA, Gilberto e BARRADAS, Ovídio., “Sistemas Radiovisibilidade”, vol. 1, 2a edição, EMBRATEL, 1978, pp 17 a 64.
- [1-2] – RIBEIRO, José Antonio Justino, “ Propagação de Ondas Eletromagnéticas: Princípios e Aplicações”, 1. ed, Érica, 2004, pp 163 a 204, 241 a 270
- [1-3] – HALL, M. P. M., BARCLAY, L. W. e Hewitt M. T., “ Propagation of Radiowaves”, British Library, 1996, 1. ed, pp 9 a 22, 38 a 58 e 60 a 102
- [1-4] – BOSCO, Leung, “ VLSI for Wireless Communication”, 1. ed, Prentice Hall, 2002, pp 15 a 38

CAPÍTULO 2

MODELOS DE PROPAGAÇÃO

Este capítulo apresenta uma coletânea dos modelos de propagação utilizados nesta dissertação, destacando os modelos em ambiente aberto (outdoor) e em macro células. Discute-se ao longo deste também, a importância da topografia e morfologia na região onde o sinal será estimado, bem como os procedimentos necessários para a calibração dos modelos na minimização dos erros.

2.1 INTRODUÇÃO

O planejamento das áreas de cobertura das estações dos sistemas celulares requer a estimativa dos níveis de sinal dessas estações, bem como das outras operando nas mesmas frequências ou frequências adjacentes. É essencial prever as zonas limites (onde o nível de sinal é mínimo) e as zonas onde pode haver interferência. Nos sistemas de telefonia celular usam-se muitas estações-base, o que pode gerar problemas na gestão do espectro de frequências e no dimensionamento da extensão das células.

A previsão do sinal envolve a estimativa do valor médio e da variância em torno deste. As coberturas são estabelecidas para determinadas percentagens de locais e de tempo. É muito importante que os modelos de propagação se aproximem da realidade o melhor possível de forma que possam se tornar ferramentas fidedignas e indispensáveis no planejamento celular de uma rede de comunicações móveis.

A maioria dos modelos fornece o valor médio do sinal recebido no ponto de recepção. Torna-se assim necessário conhecer a estatística do sinal para determinar a sua variância. A abordagem do problema da estimativa do sinal não pode ser feita de modo exclusivamente determinístico. A estimativa correta e o desenvolvimento de modelos implicam no conhecimento de todos os fatores que influenciam a propagação em comunicações móveis.

O sinal está normalmente sujeito a dois tipos de desvanecimento:

- Lento, dependente essencialmente da distância, com distribuição log-normal;
- Rápido, associado ao movimento do terminal e ao multipercurso, com distribuição de Rayleigh e Rice.

É importante o conhecimento das distribuições estatísticas adequadas ao sinal rádio de forma a prever o seu comportamento no meio de propagação. [2-1]

2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS MODELOS DE PROPAGAÇÃO

Para cálculos de atenuação em enlaces são utilizados em sua grande maioria modelos de propagação. Todos os modelos devem levar em consideração o comportamento aleatório do sinal propagado, que é principalmente relacionado com os instantes nos quais os diferentes sinais vindos de diferentes caminhos irão atingir o receptor.

Os modelos de propagação podem ser empregados para prever qual o comportamento dentro de um ambiente de propagação utilizando ferramentas computacionais que levem em consideração o ambiente. Essas ferramentas são bastante úteis, pois podem ajudar na localização dos pontos de acesso para reduzir os efeitos de atenuação ocasionados principalmente por multipercursos.

Os modelos de Propagação dividem-se em duas grandes categorias:

- Empíricos, baseados em medidas, e conduzindo a relações simples entre a atenuação e a distância. Os modelos Empíricos conduzem a curvas e equações que melhor se ajustam às medidas e têm a vantagem de contabilizar todos os fatores que afetam a propagação. Necessitam ser sujeitos a validação para locais, frequências e condições diferentes dos ambientes de medida.
- Teóricos, requerendo a utilização de bases de dados topográficos. Os modelos Teóricos não contabilizam todos os fatores e não considera o ambiente em que o móvel se desloca. Permitem uma fácil alteração para outros valores dos parâmetros e dependem da definição de bases de dados geográficas

Os modelos de propagação que vêm sendo utilizados nas últimas décadas pelos conceptores de sistemas são modelos híbridos e contemplam as perspectivas empírica e teórica. Estes modelos têm alguma flexibilidade podendo ser aferidos com medidas reais realizadas nos ambientes de propagação específicos onde vão ser utilizados. Desta forma, minimiza-se o erro entre a estimativa do sinal previsto pelo modelo de propagação e a posterior realidade, quando da implementação física da estação rádio base.

Não existe um modelo de aplicação genérico para todos os tipos de ambientes, frequências e parâmetros. [2-2]

2.3 CLASSIFICAÇÃO DE AMBIENTES

A aplicação de modelos com uma componente empírica requer a classificação de ambientes, onde é usual distinguir três grandes categorias: Rural, Suburbana e Urbana. Existem vários tipos de classificação, geralmente associadas a modelos de propagação distintos. A classificação de ambientes considera, entre outros, alguns parâmetros tais como: ondulação do terreno, densidade da vegetação, densidade e altura dos edifícios, existência de áreas abertas e existência de superfícies aquáticas.

Os edifícios vão provocar a existência de numerosos raios refletidos (causando desvanecimento), e de zonas não iluminadas diretamente (onde a atenuação é grande). A atenuação e reflexão variam de acordo com os materiais de construção. A existência de ruas conduz a fenômenos de propagação guiada, com características diferentes nas ruas radiais e nas circunferências. A proximidade dos edifícios entre si, e destes à estação móvel, pode conduzir a erros elevados na aplicação dos modelos de obstrução múltipla por lâminas.

Devido a estas características, a tarefa de aferição de um modelo de propagação com base em medidas reais não é precisa, pelo que ocorrem sempre desvios significativos entre a previsão de sinal e a realidade posteriormente implementada. [2-2]

2.3.1 MORFOLOGIA NOS MODELOS DE PROPAGAÇÃO

A base de dados de morfologia são as informações que caracterizam a cobertura do terreno: água, vegetação, casas, avenidas, parques, etc. A morfologia do terreno é levada em consideração no cálculo da perda de propagação, por alguns dos modelos de propagação.

Esses modelos consideram a morfologia de um modo diferente nos estudos de predição, todavia verifica-se, através de medidas realizadas em campo, que a morfologia tem grande influência na perda de propagação do sinal, na faixa de frequências compreendida acima de 800 MHz. [2-2]

2.4 EXAME DOS MODELOS DE PROPAGAÇÃO

Na literatura encontra-se uma infinidade de modelos de propagação aplicáveis em ambientes *outdoor*, onde a estação móvel encontra-se do lado externo de construções, prédios e casas, e ambientes *indoor*, onde a estação móvel está interna as construções, bem como em pico células, micro células e macro células.

O exame dos modelos a seguir contemplará ambientes *outdoor*, macro célula e micro células. Isto porque se pretende realizar no próximo capítulo simulações com dados reais de modo que alguns dos modelos aqui abordados possam ser utilizados e calibrados. Como os dados reais foram fornecidos por uma operadora de telefonia local, e como os mesmos não levam em consideração ambientes *indoor*, logo, os modelos aqui abordados tratarão apenas de ambientes *outdoor*.

2.4.1 MODELO DE OKUMURA [2-3], [2-4] e [2-5]

O modelo de Okumura é amplamente usado para áreas urbanas, sendo um modelo empírico, desenvolvido com base em experimentos de medidas. O modelo pode ser expresso pela equação:

$$L = L_f + A(f,d) - G(h_{te}) - G(h_{re}) - G(area) \quad (2.1)$$

Onde,

L - valor médio da perda devido ao caminho de propagação [dB];

L_f - perda de propagação no espaço livre [dB];

$A(f, d)$ - valor em [dB] encontrado em curvas empíricas, dependente;

f - frequência [MHz];

d - distancia entre a estação rádio base receptora [km].

$G(h_{te})$ - fator de ganho da estação transmissora [dB];

H_{te} - altura efetiva da antena transmissora [m];

h_{re} - altura efetiva da antena receptora [m];

$G(h_{re})$ - fator de ganho da estação receptora [dB];

$G(area)$ - valor em [dB] encontrado em curvas empíricas, expressa o ganho gerado devido ao ambiente em que o sistema está operando.

2.4.2 MODELO DE HATA [2-6], [2-7] e [2-8]

O modelo de Okumura foi tomado como referência para o desenvolvimento do modelo de Hata, que na verdade, apresenta uma formulação prática do modelo de Okumura.

O modelo de Hata, de grande aceitação, leva em consideração a morfologia sem detalhamento, isto é, utiliza “manchas” morfológicas para diferentes ambientes de propagação como área suburbana, área urbana, área urbana densa, área rural, etc.

O modelo de Hata é uma formulação empírica do modelo de Okumura. Aplica-se a uma faixa de frequências entre 150 e 1500 MHz.

Este modelo é melhor adequado para macro células por cobrir áreas maiores que 1 km. Como as cobertas por uma micro célula são inferiores a esta distância o mesmo então não é recomendado.

O valor médio da perda de propagação de uma área urbana é:

$$L = 69,55 + 26,16 \log(f) - 13,82 \log(h_{te}) - a(h_{re}) + (44,9 - 6,55 \log(h_{te})) \log(d) \quad (2.2)$$

Onde,

L - valor médio da perda devido ao caminho de propagação para área urbana [dB];

f - frequência [MHz];

h_{te} - altura efetiva da antena transmissora [m];

h_{re} - altura efetiva da antena receptora [m];

d - distância entre a estação rádio base receptora [km];

$a(h_{re})$ - fator de correção da altura efetiva da antena receptora da unidade móvel, a qual é uma função do tamanho da área de cobertura [dB].

Este fator pode ser calculado como se segue:

Para uma região urbana:

$$a(h_{re}) = (1,1 \log(f) - 0,7) h_{re} - (1,56 \log(f) - 0,8). \quad (2.3)$$

Para áreas urbanas densas e $f \leq 300$ MHz:

$$a(h_{re}) = 8,29 (\log(1,54 h_{re}))^2 - 1,1 h_{re} \quad (2.4)$$

Para áreas urbanas densas e $f > 300$ MHz:

$$a(hre) = 3,2(\log(11,75hre))^2 - 4,97hre \quad (2.5)$$

O valor médio da perda devido ao caminho de propagação para área suburbana em dB é expresso por:

$$L = L (\text{para áreas urbanas}) - 2(\log(f/28))^2 - 5,4 \quad (2.6)$$

O valor médio da perda devido ao caminho de propagação para áreas rurais abertas em dB é fornecido abaixo:

$$L = L (\text{para áreas urbanas}) - 4,78(\log(f))^2 - 18,33\log(f) - 40,98 \quad (2.7)$$

2.4.3 MODELO COST-231 Walfish-Ikegami [2-9], [2-10], [2-11], [2-12] e [2-13]

O modelo COST (Cooperation in the Field of Scientific and Technical) 231, desenvolvido a partir dos modelos de Walfish-Bertoni e Ikegami, leva em consideração a morfologia detalhada do terreno, com informações de altura de prédios, distância entre prédios, largura média das ruas e orientação destas com relação à direção de propagação.

O Comitê de Pesquisas Europeu COST 231 desenvolveu este modelo para propagação em ambientes urbanos para utilização na faixa de frequências compreendida entre 800 e 2000 MHz, e aplica-se tanto a projetos de sistemas macro celulares, como micro celulares, podendo as antenas das estações rádio base estar situadas abaixo das alturas dos prédios, ou morfologias, situadas nas proximidades.

A grande inovação do modelo do COST 231 está relacionada com o fenômeno da propagação guiada quando existe linha de visada entre a estação-base e o móvel na direção de uma rua cercada por edifícios. A propagação desta forma é diferente que da propagação em espaço livre.

A FIGURA 2-1 mostra a estação rádio base, o móvel e os parâmetros que comprovam as equações do modelo.

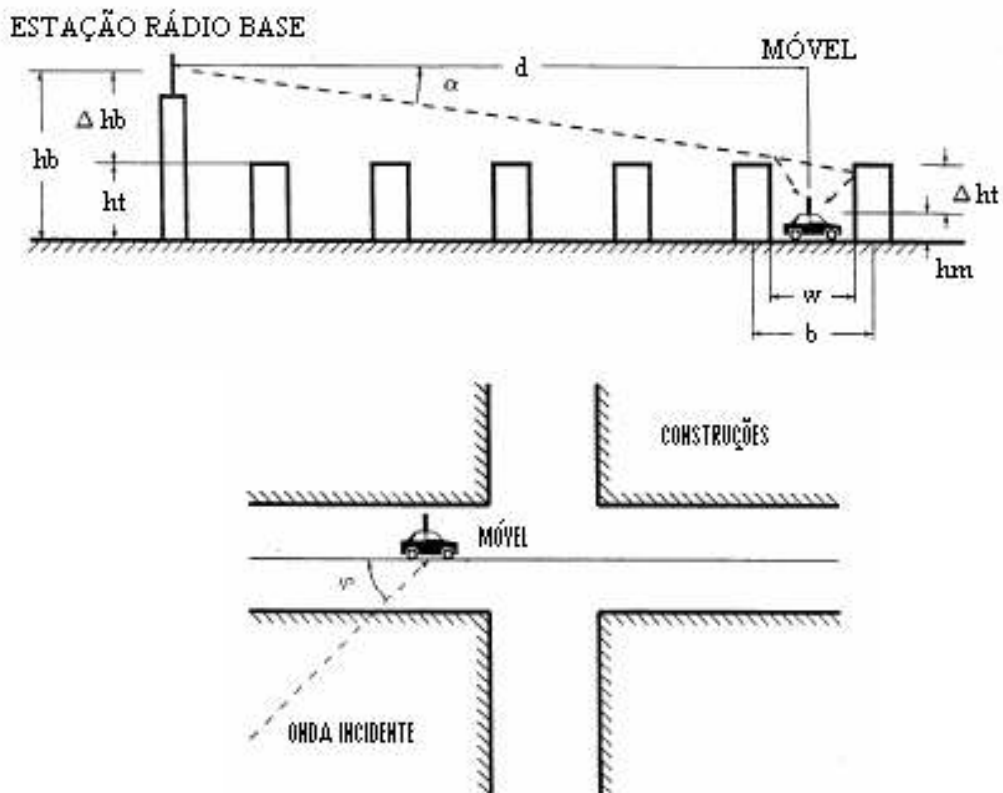


FIGURA 2-1 – Parâmetros para equações do modelo COST 231 Walfisch – Ikegami

O valor médio da perda de propagação para este modelo é dada por:

Para $d \geq 20$ metros:

$$L_t = 42,6 + 26\log(d) + 20\log(f) \quad (2.8)$$

Para $d < 20$ metros:

$$L_t = L_o \quad (2.9)$$

Onde,

L_t – Atenuação total [dB];

L_o – Atenuação de espaço livre [dB];

f – frequência (MHz);

d – distância entre a estação transmissora e receptora [km].

O modelo COST 231 de Walfisch – Ikegami possui três componentes básicos:

- Perda no espaço livre (L_o);
- Perda por difração e espalhamento no topo de edifícios (L_{rts});
- Perda devido a múltiplas difrações e reflexões ocorridas ao nível da rua ou multiplanos (L_{ms}).

Multiplano neste caso significa a diferença entre as diversas alturas de prédios que são modelados como sendo semiplanos. A morfologia exprime a altura média de seus elementos, portanto os multiplanos são as diferenças entre as morfologias na área de interesse. Logo,

$$L_t = L_o + L_{rts} + L_{ms} \quad (2.10)$$

$$L_t = L_o \text{ para } L_{rts} + L_{ms} \leq 0 \quad (2.11)$$

A atenuação por difração e espalhamento no topo de edifícios (*roof-top-to-street diffraction and scatter*) L_{rst} é dada por:

$$L_{rts} = -16,9 - 10 \log(w) + 10 \log(f) + 20 \log(\Delta hm) + L_{ori} \quad (2.12)$$

Onde,

$$L_{ori} = -10 + 0,354\varphi; \quad \text{para } 0 \leq \varphi < 35^\circ; \quad (2.13)$$

$$L_{ori} = 2,5 + 0,075(\varphi - 35); \quad \text{para } 35^\circ \leq \varphi < 55^\circ; \quad (2.14)$$

$$L_{ori} = 4 + 0,114(\varphi - 55) \quad \text{para } 55^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ. \quad (2.15)$$

Onde,

f – frequência (MHz);

d – distância entre a estação rádio base receptora [km];

Δhm – diferença entre a altura dos telhados dos prédios (ht) e a altura da antena da estação móvel (hm) em metros ($\Delta hm = ht - hm$);

L_{ori} – fator de correção devido à orientação da rua em função do ângulo de incidência φ [dB];

φ – ângulo de incidência [graus];

w – largura das ruas [metros].

A atenuação devido a múltiplas difrações e reflexões ocorridas ao nível da rua (*multi-screen diffraction*) Lms é dada por:

$$Lms = Lbsh + Ka + Kd \log(d) + Kf \log(f) - 9 \log(b) \quad (2.16)$$

Onde,

f – frequência (MHz);

d – distância entre a estação rádio base receptora [km];

b – distância entre os prédios ao longo do percurso da onda eletromagnética [m].

O valor Lms é determinado segundo o modelo de Wallfisch-Bertoni, onde os prédios são modelados como sendo semiplanos. A onda plana incidente no topo dos semiplanos é caracterizada pelo ângulo de incidência α .

Os termos $Lbsh$ e Ka não existem no modelo de Walfisch-Bertoni e representam o incremento da atenuação no percurso devido a redução da altura da estação transmissora (hb), as equações abaixo expressão estes valores:

$$Lbsh = -18 \log(1 + \Delta hb) ; \text{ para } hb > ht \quad (2.17)$$

$$Lbsh = 0 \quad ; \text{ para } hb \leq ht \quad (2.18)$$

$$Ka = 54 \quad ; \text{ para } hb > ht, \quad (2.19)$$

$$Ka = 54 - 0,8 \Delta hb \quad ; \text{ para } d \geq 0,5 \text{ km e } hb \leq ht \quad (2.20)$$

$$Ka = 54 - 0,8 \Delta hb(d/0,5) , \text{ para } d < 0,5 \text{ km e } hb \leq ht \quad (2.21)$$

Onde,

Δhb – diferença entre a altura da antena da estação transmissora (hb) e a altura dos telhados dos prédios (ht) em metros ($\Delta hb = hb - ht$).

Os termos kd e kf controlam a dependência de $Lmsd$ com a distância e a frequência respectivamente, e estão relacionados com a atenuação devido à difração sobre múltiplos semiplanos considerados no modelo como função da distância e da frequência de operação, respectivamente, e são definidos como:

$$Kd = 18; \text{ para } hb > ht \quad (2.22)$$

$$Kd = 18 - 15(\Delta hb/ht); \text{ para } hb \leq ht \quad (2.23)$$

$$Kf = -4 + 0,7 (f/925 - 1); \text{ para cidades de porte médio} \quad (2.24)$$

$$Kf = -4 + 1,5 (f/925 - 1); \text{ para centros metropolitanos} \quad (2.25)$$

O modelo é válido para hb entre 4 e 50 metros, hm entre 1 e 3 metros e d entre 20 metros e 5 km. O modelo do COST 231 de Walfisch-Ikegami tem sido verificado na prática nas bandas dos 900 e 1800 MHz e para distâncias compreendidas entre os 100 m e 3 km. Os erros de previsão aumentam consideravelmente para altura de estação rádio base (hb) aproximadamente igual à altura dos telhados das edificações (ht), quando comparados com a altura de estação rádio base (hb) muito maior que a altura dos telhados das edificações (ht). Logo, este modelo não deve ser utilizado com a certeza de bons resultados para a altura de estação rádio base (hb) menor ou igual à altura dos telhados das edificações (ht).

2.4.4 MODELO DE LEE [2-14], [2-15], [2-16] e [2-17]

O modelo de Lee, válido para frequências em torno de 900 MHz, é um modelo empírico bem conhecido e aceito para estudos de predição de cobertura de sistemas celulares.

A partir de experimentos, Lee verificou que a taxa de atenuação do nível de sinal em função da distância (dada em $dB/década$), varia conforme o tipo de terreno, ou elemento morfológico. O modelo fornece alguns exemplos de morfologias, com seus respectivos parâmetros: taxa de atenuação (em $dB/década$) e nível de sinal recebido no ponto de interseção a 1,6 km (uma milha) da ERB (em dBm). Esses dois parâmetros devem ser obtidos em condições padrão onde se considera as alturas das antenas de transmissão (Tx) e de recepção (Rx), bem como a potência de transmissão,

Então, o modelo de Lee utiliza um conjunto de parâmetros, obtidos a partir de condições-padrão para caracterizar o comportamento da propagação de RF de cada morfologia presente na área de interesse.

Este modelo não considera a morfologia de modo detalhado, mas trabalha com “manchas” morfológicas tais como: área urbana densa, área urbana, área suburbana, vegetação densa, vegetação média, vegetação rasteira e água. Para este modelo não são

necessários detalhes como distâncias entre prédios, alturas e disposições ao longo da área de interesse.

Uma vez que os parâmetros utilizados por Lee são obtidos através de experimentos, as características de propagação sobre as morfologias podem variar de uma região para outra, podendo variar também a classificação dos próprios elementos morfológicos.

O modelo de Lee é um modelo ponto-a-ponto que efetua a previsão da média do nível de sinal recebido ao longo de uma radial em um ambiente de comunicação móvel, além de permitir que sejam efetuadas medidas reais coletadas em campo, onde é possível aferir o modelo aproximando-o ao ambiente específico de propagação e minimizando o erro entre a previsão e as medidas obtidas.

O modelo é expresso pela equação:

$$Pr = Po - \gamma \log(r/r_0) + Af + Geffh(he,hl) + L + \alpha \quad (2.26)$$

Sendo que o termo $Po - \gamma \log(r/r_0) + Af$ representa a atenuação de propagação área a área.

Onde,

Pr = Potência de recepção [dBm];

Po = Potência de recepção no ponto de interseção [dBm];

γ = Decaimento da atenuação de propagação ou fator de rugosidade do terreno [dB/década];

r = Distância entre a estação-base e o móvel [km];

r_0 = Distância entre a estação-base e o ponto de interseção [km];

$Geffh$ – Ganho devido à altura efetiva [dB], valor dependente de he (altura efetiva da antena da estação-base [m]) e hl (altura real da antena da estação-base [m]);

L = Perdas por difração no terreno – perdas por sombreamento [dB];

Af = Fator de ajuste da frequência [dB];

α = Fator de ajuste do sinal.

Os seguintes aspectos devem ser levados em consideração pelo projetista na aplicação do modelo:

1. *Linha de Visada – onda direta:*

Existe linha de visada entre o móvel e a estação-base., quando o raio direto entre a estação-base e o móvel não se encontra obstruído pelo terreno. Neste

caso, o ganho associado à variação da altura efetiva da antena torna-se um elemento fundamental na determinação do sinal recebido. O ganho associado à variação da altura efetiva da antena da estação-base pode variar de acordo com o perfil de terreno ao longo de uma mesma radial.

2. *Sem linha de visada - sombreamento*

Neste caso não existe altura efetiva da antena, logo as perdas são fundamentalmente devidas à difração associada ao perfil de terreno.

3. *Existência de água*

Quando o percurso do sinal está entre a estação-base e o móvel passando sobre água, uma atenuação de espaço livre de 20 dB/década deve ser aplicada. É claro que o modelo conta com uma base de dados bem delineada em termos da localização das superfícies aquáticas.

2.4.4.1 ATENUAÇÃO DE PROPAGAÇÃO ÁREA A ÁREA

A atenuação de propagação área a área é um dos termos fundamentais do modelo de Lee. Fundamenta-se no decaimento da atenuação de propagação e no ponto de interseção a distância de 1,6 km (uma milha). O valor do decaimento bem como o valor associado ao ponto de interseção é utilizado para prever o nível de sinal de cada ponto ao longo de uma radial. Estes valores podem ser usados em previsões em áreas similares sem ser necessário refazer as medidas.

Se não existem medidas efetuadas, o projetista pode recorrer a valores existentes na TABELA 2-1 retirada de medidas reais da FIGURA 2-2.

TABELA 2-1 – Valores de decaimento e ponto de interseção derivados de medidas reais

AMBIENTE	P_o (dBm)	γ (dB/década)
Espaço Livre	-45,0	20,0
Área Aberta	-49,0	43,5
Suburbano	-61,7	38,4

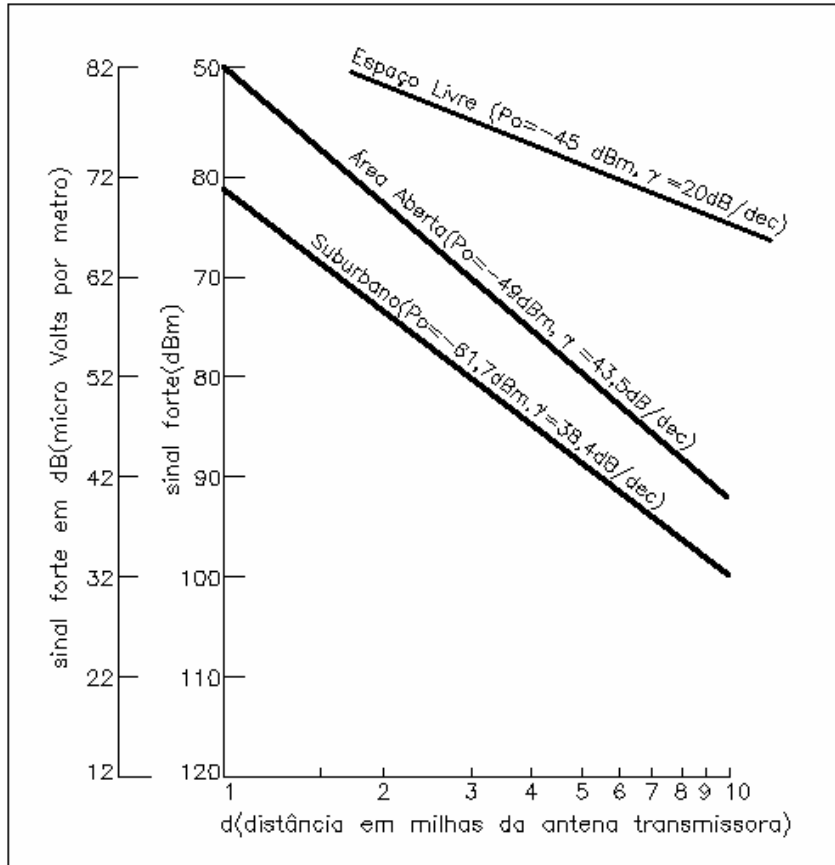


FIGURA 2-2 – Valores de decaimento e ponto de interseção derivados de medidas reais

2.4.4.2 FATOR DE AJUSTE DA FREQUÊNCIA (A_f)

A frequência de referência do modelo é de 850 MHz. O modelo é válido para três bandas de portadoras e definido para dois ambientes, a TABELA 2-2 mostra as bandas, os ambientes e o ajuste da frequência (A_f) em [dB], onde f é a frequência da portadora dada em [MHz].

TABELA 2-2 – Fator de ajuste das frequências (A_f)

BANDA	AMBIENTES	
	URBANO	RESTANTES
150 a 450 MHZ	$A_f = 8,29 - 20\log(f / 850)$	$A_f = - 20\log(f / 850)$
450 a 850 MHZ	$A_f = - 30\log(f / 850)$	$A_f = - 20\log(f / 850)$
850 a 2400 MHZ	$A_f = - 30\log(f / 850)$	$A_f = - 30\log(f / 850)$

2.4.4.3 GANHO ASSOCIADO À ALTURA EFETIVA DA ANTENA (G_{effh})

Quando o raio direto entre a estação-base e o móvel não se encontra obstruído pelo terreno, o sinal recebido é composto pela interferência entre a onda direta e ondas refletidas.

A determinação do nível de sinal recebido devido a uma alteração da altura real da antena da estação-base depende da variação da altura efetiva da antena e não só da própria altura da antena medida acima do solo.

O ganho associado à variação da altura efetiva da antena é determinado a partir do perfil de terreno entre a estação-base e o móvel.

A determinação do ponto especular é utilizada para calcular o ganho associado à altura efetiva da antena. Têm como base quatro parâmetros:

- Altura do sistema de antenas da estação-base - $h1$ (m);
- Altura da antena do móvel - $h2$ (m);
- Distância do móvel à estação base - d (m);
- Perfil de terreno entre o móvel e a estação-base.

A determinação do ponto especular e da altura efetiva (he) da antena utiliza o *método das imagens* (que nada mais é que o rebatimento da antena de transmissão) que pode ser observado nas FIGURAS 2-3 e 2-4. A imagem da antena da estação-base é ligada à antena do móvel. O ponto de intersecção com o terreno é considerado um ponto de reflexão ($R1$). Em seguida liga-se o ponto da imagem da antena do móvel à antena da estação-base. O ponto de intersecção com o terreno é considerado um ponto de reflexão ($R2$).

O modelo de Lee utiliza o ponto de reflexão que se encontra mais perto do móvel. Desenha-se um plano de terra tangente ao perfil de terreno desde a elevação média junto ao móvel passando pela elevação média junto ao ponto de reflexão especular prolongando-o até à localização da estação-base.

A altura efetiva da antena é a distância entre o centro de emissão da antena e a intersecção do plano de terra.

O valor do ganho associado à variação da altura efetiva da antena é expresso pela relação:

$$G_{effh} = 20 \log (he / h1) \quad (2.27)$$

As FIGURAS 20 e 21 apresentam a determinação dos pontos supracitados para $Geffh > 0$, terreno plano e $he > h1$, e $Geffh < 0$, terreno plano e $he < h1$, respectivamente.

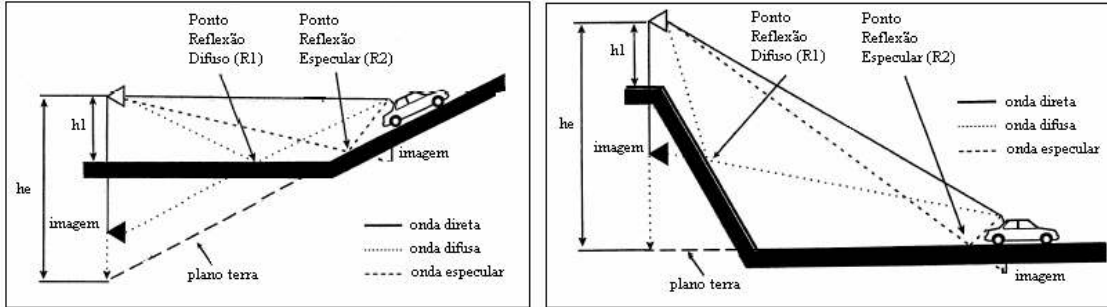


FIGURA 2-3 – Determinação do ponto especular e altura efetiva para $G_{eff} < 0$

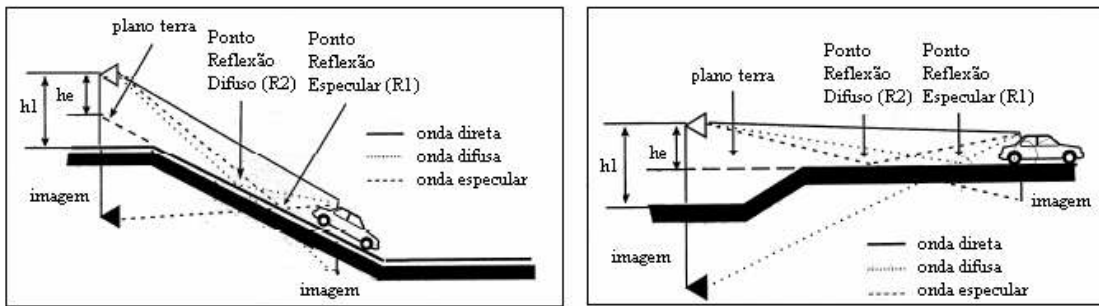


FIGURA 2-4 – Determinação do ponto especular e altura efetiva para $G_{eff} > 0$

2.4.4.4 FATOR DE AJUSTE (α)

As previsões de cobertura são efetuadas ao longo de radiais utilizando determinados parâmetros padrões relacionados com a estação-base e o móvel.

Este termo da equação 2.26 tem como objetivo ajustar a previsão a partir da definição dos parâmetros reais da estação-base e móvel.

O ajuste é efetuado em níveis de: potência de transmissão, alturas dos centros de emissão das antenas da estação-base e móvel e ganhos das antenas da estação-base e móvel.

O valor de α em dB é:

$$\alpha = 10 \log\left(\frac{P_t}{P_{tp}}\right) + 20 \log\left(\frac{h_1}{h_{1p}}\right) + 10 \log\left(\frac{h_2}{h_{2p}}\right) + (G_r - G_{rp}) + (G_m - G_{mp}) \quad (2.28)$$

Onde ,

P_t - Potência de emissão da estação - base (W);

P_{tp} - Potência de emissão padrão da estação - base (W);

h_1 - Altura da antena da estação – base (m);

h_{1p} - Altura padrão da antena da estação – base (m);

h_2 - Altura da antena do móvel (m);

h_{2p} - Altura da antena padrão do móvel (m);

G_r - Ganho da antena da estação - base (dBd);

G_{rp} – Ganho padrão da antena da estação - base (dBd);

G_m - Ganho da antena do móvel (dBd);

G_{mp} – Ganho padrão da antena do móvel (dBd).

Os valores padrão para o modelo de Lee são:

P_{tp} – 10 W;

h_{1p} - 30 m;

h_{2p} – 3 m;

G_{rp} – 6 dBd;

G_{mp} – 0 dBd.

2.4.4.5 PERDAS POR DIFRAÇÃO NO TERRENO (L)

Também conhecida como perdas por sombreamento, este termo deve ser calculado quando existe obstrução parcial ou total do raio direto entre a estação-base e o móvel devido a um obstáculo em lâmina isolado. As perdas por difração (L) em dB são definidas pela teoria de difração de *Fresnel-Kirchoff*. L é função do parâmetro adimensional v . Expresso por:

$$v = -hp \sqrt{\left(\frac{2}{\lambda}\right) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right)} \quad (2.29)$$

Onde,

hp - altura da obstrução acima ou abaixo do raio direto (m);

λ - comprimento de onda (m);

r_1 - distância da estação - base ao obstáculo em lâmina (m);

r_2 - distância do obstáculo em lâmina ao móvel (m).

A FIGURA 2-5 apresenta o diagrama básico dos parâmetros de v para perdas por difração.

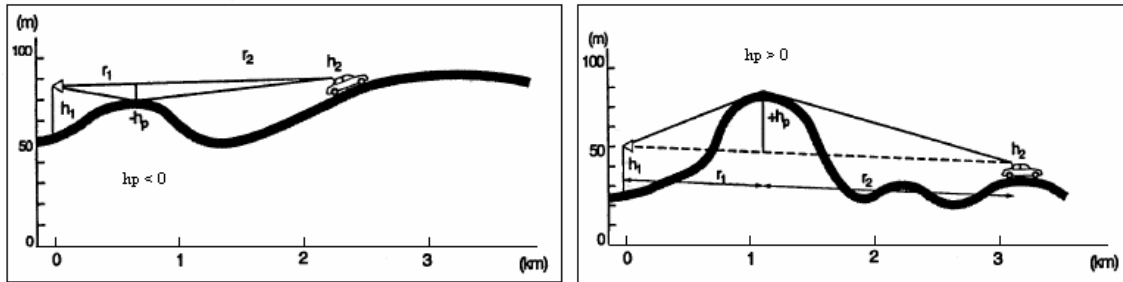


FIGURA 2-5 – Diagrama dos parâmetros de v para perda por difração no terreno com $h_p < 0$ e $h_p > 0$.

A perda por sombreamento pode ser expressa em termos das integrais de Fresnel com o argumento v . Para diferentes faixas de v , a perda L em dB pode ser aproximada pelas seguintes funções:

$$L = 0; \quad 1 < v \quad (2.30)$$

$$L = -20 \log (0,5 + 0,62 v); \quad 0 < v < 1 \quad (2.31)$$

$$L = -20 \log (0,5e^{0,92 v}); \quad -1 < v < 0 \quad (2.32)$$

$$L = -20 \log (0,4 - \sqrt{0,1184 - (0,1v + 0,38)^2}); \quad -2,4 < v < -1 \quad (2.33)$$

$$L = -20 \log \left(-\frac{0,225}{v} \right); \quad v < -2,4 \quad (2.34)$$

2.4.5 MODELO DE ERCEG [2-18], [2-19], [2-20] e [2-21]

Este modelo estatístico derivado de dados experimentais em regiões norte americanas na frequência de 1,9 GHz é utilizado em macro células. A atenuação no percurso é fornecida pela equação:

$$L = A + 10\gamma \log \left(\frac{d}{d_0} \right) + s; \quad d \geq d_0 \quad (2.35)$$

Onde,

d – distância da estação móvel até a estação base (m);

A – ponto de intercessão (dB), dado por:

$$A = 20 \log\left(\frac{4\pi d_0}{\lambda}\right) \quad (2.36)$$

d_0 – distância do ponto de intercessão até a estação base igual a 100 metros para o modelo

λ – comprimento de onda (m)

s – variável gaussiana randômica de média zero definida por uma variável gaussiana de média zero e seu desvio padrão.

$$s = y\sigma \quad (2.37)$$

$$\sigma = \mu_\sigma + z \sigma_\sigma \quad (2.38)$$

y – variável gaussiana de média zero;

z – variável gaussiana de média zero;

μ_σ – média de σ ;

σ_σ – desvio padrão de σ ;

γ – variável gaussiana randômica adimensional que caracteriza o decaimento na macro célula dentro da morfologia, dada por:

$$\gamma = \left(a - bh + \frac{c}{h}\right) + x\sigma_\gamma; 10 \text{ m} \geq h \geq 80 \text{ m} \quad (2.39)$$

Onde,

h – altura da antena da estação base (m);

x – variável gaussiana de média zero;

σ_γ – desvio padrão de γ .

A FIGURA 2-3 apresenta os parâmetros para no modelo, na região dos Estados Unidos da América, para três categorias de terreno.

TABELA 2-3 – Parâmetros do modelo de Erceg

PARÂMETRO	TIPO DO TERRENO		
	ALTA DENSIDADE DE ÁRVORES	MODERADA DENSIDADE DE ÁRVORES	BAIXA DENSIDADE DE ÁRVORES
a	4,6	4,0	3,6
b [m ⁻¹]	0,0075	0,0065	0,0050
c [m]	12,6	17,1	20,0
σ_γ	0,57	0,75	0,59
μ_σ	10,6	9,6	8,2
σ_σ	2,3	3,0	1,6

2.5 INTEGRAÇÃO DOS MODELOS COM MEDIDAS REAIS

Qualquer modelo de propagação quando de sua utilização necessita de um ajuste no nível de sinal estimado pelo modelo, isto é realizado utilizando medidas reais coletadas no ambiente de propagação específico. Isto devido aos seguintes fatores:

- Cada cidade tem as suas características particulares em termos de propagação do sinal, devido essencialmente ao tipo de infra-estruturas existentes.
- Utilizando medidas reais, pode-se minimizar o erro entre elas e as previsões melhorando o comportamento do modelo.

O *drive-test* que se refere aos valores reais medidos do sinal é realizado para ajudar os engenheiros de RF com as atividades de planejamento e otimização de um sistema de telecomunicações.

O *drive-test* ajuda a:

- Determinar a área de cobertura das estações-base;
- Reduzir problemas de interferência no “uplink” e “downlink”;
- Avaliar e melhorar a qualidade do sistema;
- Caracterizar o ambiente de propagação.

2.6 CONCLUSÃO

O capítulo explana a importância da topografia e morfologia na previsão do sinal.

Após realizar uma revisão bibliográfica sobre os artigos e publicações a respeito dos modelos de propagação desenvolvidos, este capítulo apresenta os principais modelos utilizados dentro de uma infinidade de modelos propostos tanto para macro células como micro células.

Nos diversos modelos estudados a morfologia é caracterizada por parâmetros que são definidos de forma empírica para cada ambiente, portanto é importante que se tenha uma boa definição destes parâmetros para minimizar erros.

Estes modelos foram apresentados devido às simulações que serão apresentadas no CAPÍTULO 3, o qual apresenta dados reais de estações base da rede celular GSM da região de Curitiba. Estes modelos terão aplicabilidade direta no software de simulação apresentado no próximo capítulo.

2.7 REFERÊNCIAS

- [2-1] BERTONI H. L., “Radio Propagation for Modern Wireless Systems”, Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall PTR, 2000 pp 90-92
- [2-2] K. Low, “Comparison of Urban Propagation Models with CWMeasurements,” IEEE Vehicular Technology Sociep 42nd VTS Conference. Frontiers of Technology. From Pioneers to the 21st Century, 2, 1992, pp. 936-942.
- [2-3] Y. Okumura, E. Ohmori, T. Kawano, and K. Fukuda, “Field strength and its variability in VHF and UHF land-mobile radio service,” Review Electrical Communication Laboratory, vol. 16, pp. 825-873, 1968.
- [2-4] J. Minseok, L. Bomson, “Comparison between path-loss prediction models for wireless telecommunication system design”; Antennas and Propagation Society international Symposium, 2001. IEEE Volume 2, 8-13 July 2001 pp 186 - 189
- [2-5] E. Nazar, M. A. Salam, A. Al-Lawati, O. Al-Qasmi, M. Al-Gheithi, Z. Nadir. “Modification of an Open Area Okumura-Hata Propagation Model Suitable for Oman”; TENCON 2005 IEEE Region 10 Nov. 2005 pp 1 - 4
- [2-6] M. Hata, “Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Service,” IEEE Transactions on Vehicular Technology, VT-29,3, 1980, pp. 317-325.

- [2-7] A. Medeisis, A. Kajackas, "On the use of the universal Okumura-Hata propagation prediction model in rural areas" Vehicular Technology Conference Proceedings, 2000. VTC 2000-Spring Tokyo. 2000 IEEE 51st, Volume 3, 15-18 May 2000 pp 1815 – 1818.
- [2-8] G.Y Delisle, J. P. Lefevre, M. Lecours, J. Y. Chouinard, "Propagation loss prediction: A comparative study with application to the mobile radio channel., Vehicular Technology, IEEE Transactions on Volume 34, Issue 2, May 1985 pp 86 - 96
- [2-9] J. Walfisch and H. L. Bertoni, "A Theoretical Model of UHF Propagation in Urban Environments," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, AP-36, 12, 1988, pp. 1788-1796.
- [2-10] F. Ikegami and S. Yoshida, "Analysis of multipath propagation structure in urban mobile radio environments," IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. AP-28, pp. 531 - 537, 1980.
- [2-11] F. Ikegami, S. Yoshida, T. Takenchi, and M. Umehira, "Propagation factors controlling mean field strength on urban streets," IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. AP-32, 1984.
- [2-12] H. L. Bertoni, W. Honcharenko, L. R. Macel, and H. H. Xia, "UHF Propagation Prediction for Wireless Personal Communications," Proceedings of the IEEE, 1994, pp. 1333-1359.
- [2-13] A.P. Garcia, H Ortega, A. Navarro, A.H. Rodriguez, "Effect of terrain on electromagnetic propagation in urban environments on the Andean region, using the COST231-Walfisch-Ikegami model and GIS planning tools Antennas and Propagation", 2003. (ICAP 2003). Twelfth International Conference on (Conf. Publ. No. 491) Volume 1, 31 March-3 April 2003 pp :270 - 275
- [2-14] W. C. Lee and Y. S. Yeh, On the Estimation of the Second- Order Statistics of Log Normal Fading in Mobile Radio Environment, IEEE Transactions on Communications Com-22 (June 1974): 869-873.
- [2-15] W. C. Y. Lee, "Cochannel interference reduction by using a notch in tilted antenna pattern," in IEEE VTC-35th, Boulder CO, May 1985, pp. 61-72.
- [2-16] W.C.Y. Lee, "Estimate of Local Average Power of a Mobile Radio Signal", IEEE Trans. Veh. Technol., Vol. VT-34, No 1, February 1985, pp. 22-27.
- [2-17] IEEE Vehicular Technology Society Committee on Radio Propagation, "Coverage Prediction for Mobile Radio Systems Operating in the 800/900 MHz Frequency Range," IEEE Transactions on Vehicular Technology, VT-37, 1, February 1988, pp. 3-72.
- [2-18] Erceg, V.; Greenstein, L.J.; Tjandra, S.Y.; Parkoff, S.R.; Gupta, A.; Kulic, B.; Julius, A.A.; Bianchi, R. "An empirically based path loss model for wireless

channels in suburban environments” Selected Areas in Communications, IEEE Journal on Volume 17, Issue 7, Jul 1999, pp 1205 – 1211

- [2-19] V. Erceg, S. J. Fortune, J. Ling, A. J. Rustako Jr., and R. A. Valenzuela, “Comparisons of a Computer-Based Propagation Prediction Tool with Experimental Data Collected in Urban Microcellular Environments,” IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 15,4, May 1997, pp. 677-684.
- [2-20] U. Liebenow and P. Kuhlman, “A three-dimensional wave propagation model for macrocellular mobile communication networks in comparison with measurements,” in Proc. IEEE Veh. Technol. Conf., 1996, pp. 1623–1627.
- [2-21] V. Erceg, S. Ghassemzadeh, M. Taylor, Li, D.; D.L. Schilling, “Urban/suburban out-of-sight propagation modeling”, Communications Magazine, IEEE Volume 30, Issue 6, June 1992 pp 56 – 61

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA PARA DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS DE PROPAGAÇÃO

Após a apresentação tutorial sobre propagação do sinal e alguns de seus modelos realizada nos capítulos precedentes, este capítulo apresenta o desenvolvimento metodológico baseado nestes conceitos para a futura aplicação do estudo do sinal de telefonia móvel na tecnologia GSM (Global System for Mobile Communications), para a região central de Curitiba. Os dados relacionados as estações rádio base e níveis de recepção para a região de estudo foram coletados e cedidos por uma operadora móvel local. As simulações para predição do sinal aplicando os modelos estudados será realizada pelo pacote de softwares da CELPLAN Wireless Technology, ferramentas CELPLANNER e CELTOOLS.

3.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo têm por objetivo a descrição de uma metodologia para a otimização do planejamento de um sistema móvel pessoal. Serão então analisados neste capítulo aspectos relativos: ao dimensionamento do sistema, as características técnicas das estações transmissoras, aos aspectos de predição anteriormente abordados, a filtragem dos dados, a inserção das medidas, os aspectos de calibração e finalmente as características estatísticas do sistema.

A base de dados ¹, tanto das estações transmissoras quanto dos níveis de sinal recebidos para a validação da metodologia provém de uma operadora de telefonia móvel e os softwares utilizados para as simulações provém da *Celplan Wireless Technology* ²

O diferencial da metodologia apresentada neste trabalho reside no fato de que a mesma permite o ajuste de parâmetros dos modelos de propagação e conseqüentemente uma otimização dos mesmos, de modo a diminuir os erros de predição comuns quando se trata de concepção de um sistema móvel pessoal ou qualquer enlace de comunicação sem fio.

Resalta-se que foi realizado um extenso trabalho bibliográfico e que não foi encontrada dentro da literatura utilizada uma metodologia específica, tal qual a que se pretende mostrar neste capítulo. O trabalho de Gouveia [3-1] que também desenvolve uma metodologia, assim como os trabalhos de Stalke [3-2], Felice [3-3] e Saraiva [3-4], não realizam predições com dados reais, ao mesmo tempo em que não consideram nas predições realizadas, os vários modelos de propagação e seus parâmetros que são considerados neste trabalho. O fluxograma apresentado a seguir, servirá como base para a compreensão deste capítulo.

3.2 FLUXOGRAMA

O objetivo do fluxograma apresentado é o de nortear o conceptor do sistema sobre pontos importantes a serem considerados quando do planejamento do sistema, ao mesmo tempo em que se desenvolve uma metodologia de concepção, objeto deste capítulo. A FIGURA 3-1 apresenta um fluxograma com a metodologia proposta.

¹ Os dados foram fornecidos pela operadora TIM (Telecom Italia Mobile).

² A Celplan é uma empresa desenvolvedora de softwares de predição de sinais em diversas tecnologias, e é a detentora dos direitos das ferramentas computacionais: Celplanner® - ferramenta de predição do sinal e Celtools® - ferramenta de calibração da morfologia.

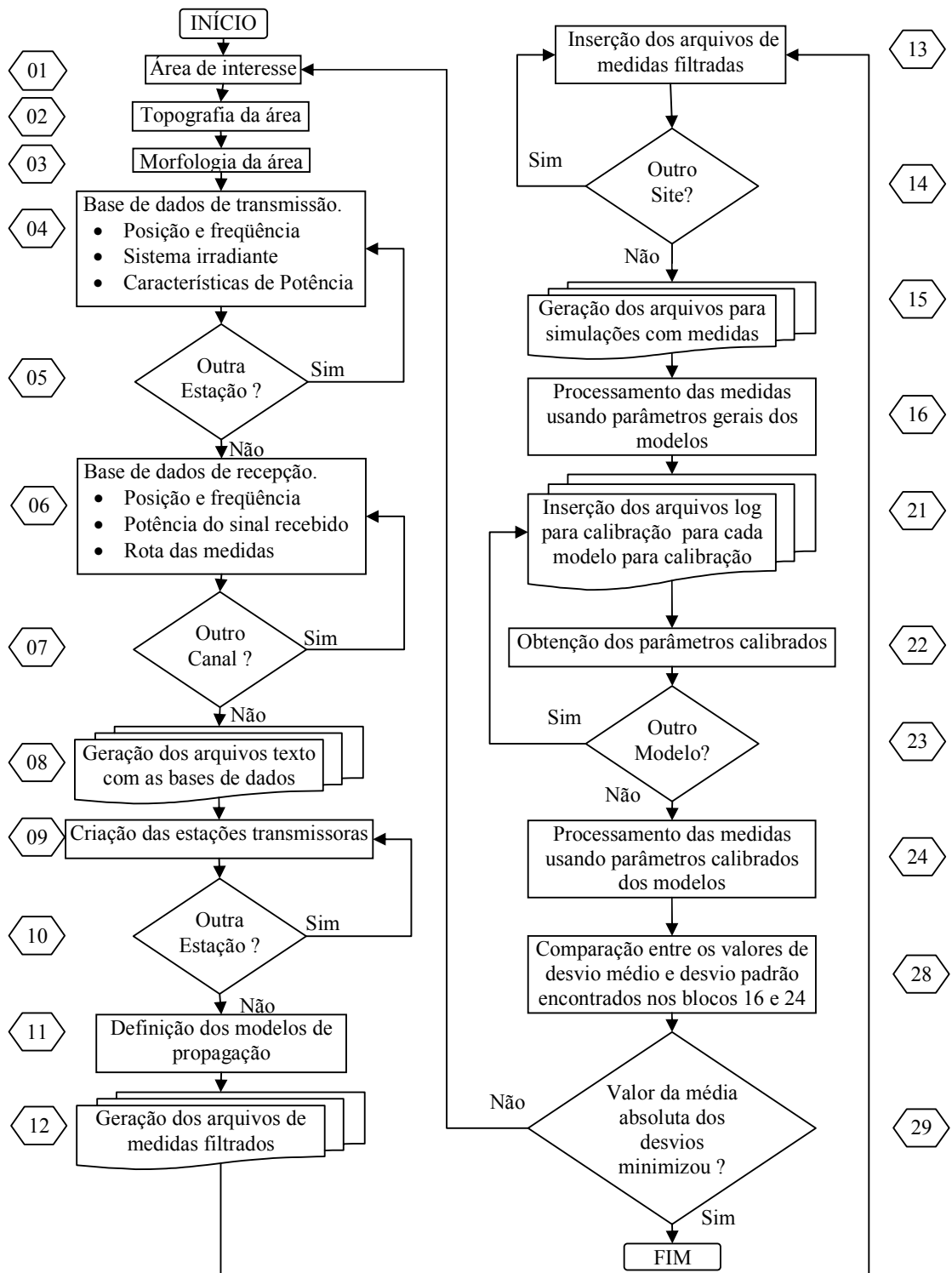


FIGURA 3-1 – Fluxograma da metodologia proposta

A FIGURA 3-2 mostra o fluxograma do bloco de processamento das medidas no software utilizando os parâmetros gerais de propagação dos modelos, este bloco é parte integrante do fluxograma da metodologia proposta.

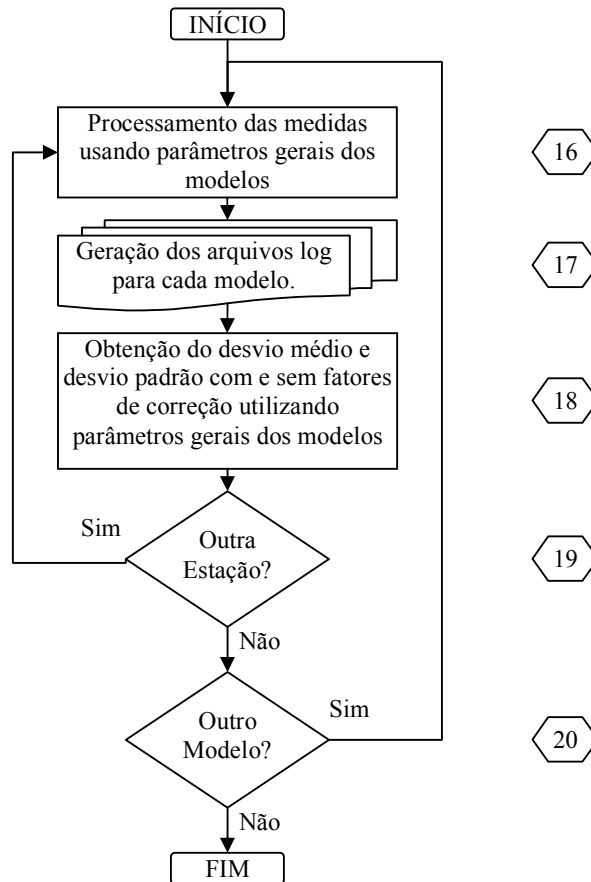


FIGURA 3-2 – Fluxograma do Bloco de Processamento de Medidas usando parâmetros gerais dos modelos

A FIGURA 3-3 mostra o fluxograma do bloco de processamento das medidas no software utilizando os parâmetros calibrados de propagação dos modelos, este bloco é parte integrante do fluxograma da metodologia proposta.

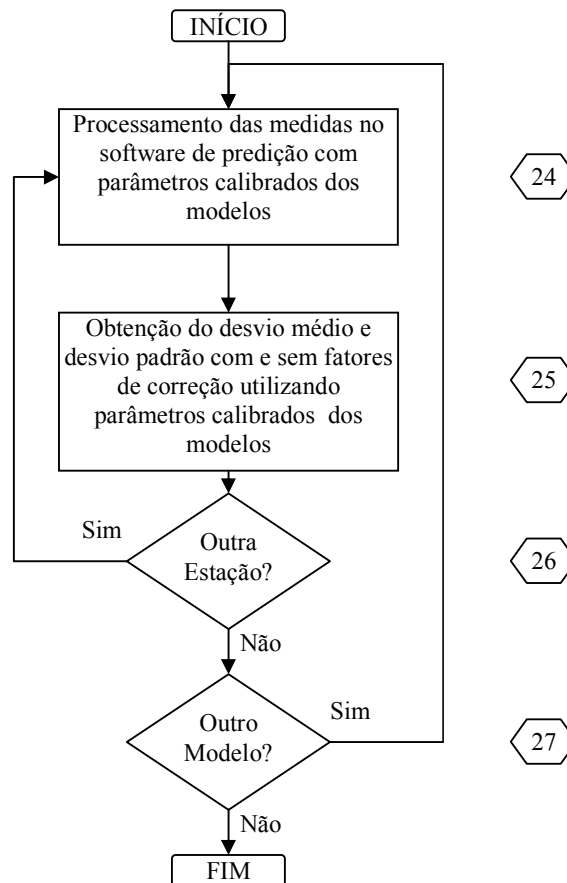


FIGURA 3-3 – Fluxograma do Bloco de Processamento de Medidas usando parâmetros calibrados dos modelos

3.3 BASE DE DADOS

Entenda-se por base de dados os dados necessários para avaliação do sinal em propagação e estes devem então compreender a área de interesse, a topografia do terreno, a morfologia da região e o mapa geográfico do local. O primeiro bloco do fluxograma refere-se à área de interesse, esta é mostrada na FIGURA 3-4, onde foi fornecida pela operadora as características técnicas das estações de transmissão e o sinal recebido em uma rota traçada, esta área se encontra na região central de Curitiba no estado do Paraná e tem aproximadamente 4 km² de área.

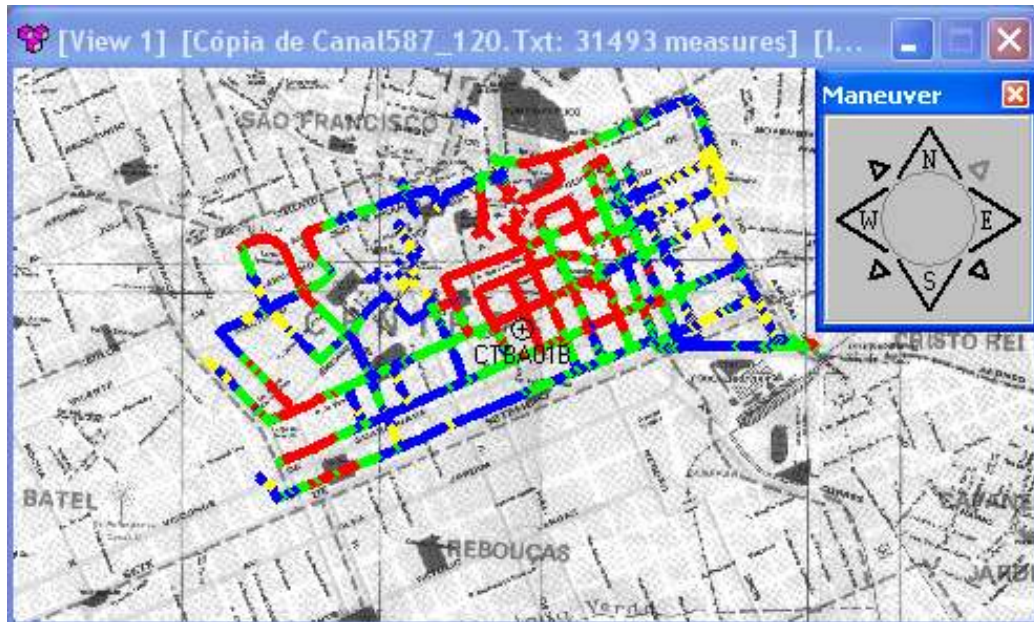


FIGURA 3-4 – Rota usada na região central de Curitiba

Os dados topográficos alvo do segundo bloco apresentam a altitude do terreno no qual os dados das estações transmissoras e os pontos receptores estão inseridos, a FIGURA 3-5 mostra a topografia da área em estudo com suas respectivas altitudes compreendidas entre 883 m e 945 m mostradas no plano de fundo verde.

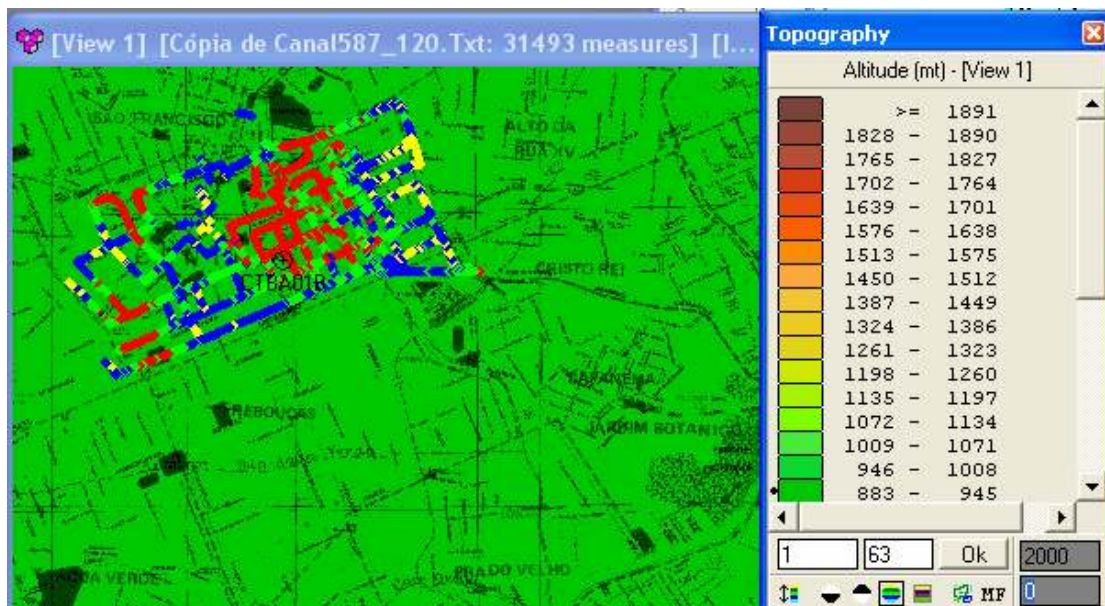


FIGURA 3-5 – Topografia das medidas

Já os dados de morfologia, do terceiro bloco, contêm informações sobre alturas médias de prédios, casas, árvores, etc. O conhecimento destes tipos de morfologia é essencial nos procedimentos de predição do nível de sinal, pois estes são os principais elementos de obstrução do sinal situados sobre o relevo, a FIGURA 3-6 mostra a morfologia do terreno, onde se observa a característica urbana e urbana densa da região em estudo. A base de dados de topografia e morfologia utilizada é a disponibilizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) bem como, o Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba (IPPUC).

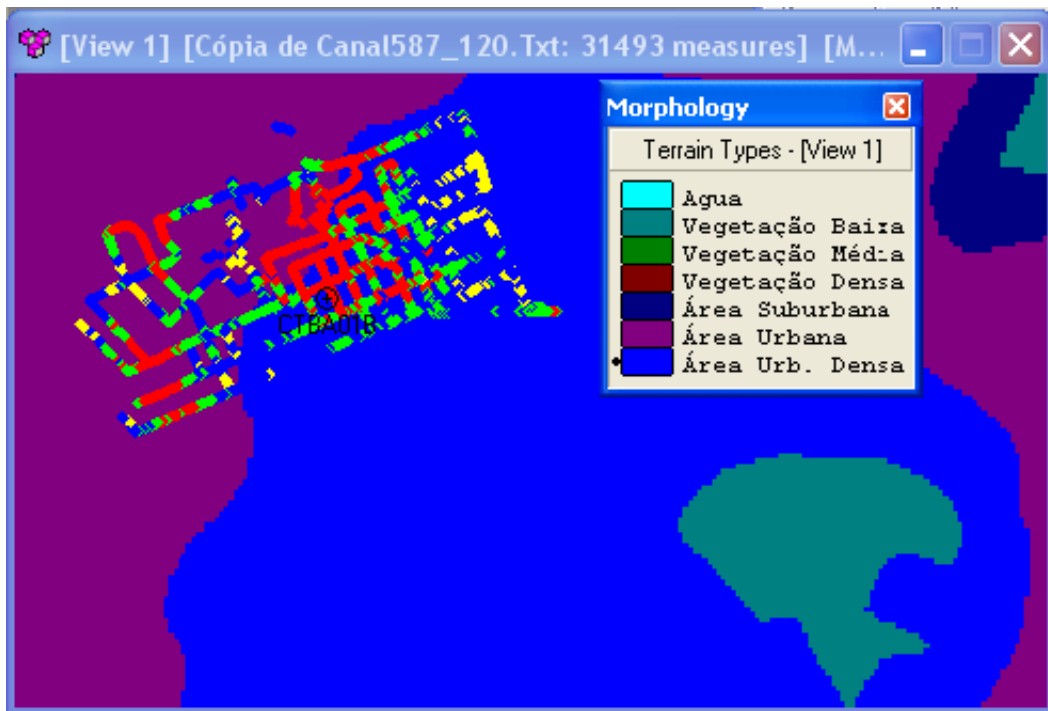


FIGURA 3-6 – Morfologia do terreno

Os dados que fornecem a geografia do local são itens para que o conceptor saiba, a priori, aonde as antenas transmissoras poderão ser colocadas. Somente após a análise destes dados é que se realiza a análise das características técnicas das estações transmissora envolvidas. O quarto e quinto blocos formam um *loop* onde são caracterizadas 24 estações dentro da área de estudo.

A TABELA 3-1 sumariza as características técnicas gerais das estações. Observa-se que a mesma fornece o código da estação (site), o nome da estação, as coordenadas geográficas (latitude e longitude), os canais de *downlink*, que correspondem respectivamente às frequências de *downlink* em MHz (da estação transmissora para o móvel) o que por si só pressupõem que a tecnologia utilizada na concepção é o GSM (*Global System Mobile*) e a altitude da estação transmissora em metros.

TABELA 3-1 – Características técnicas gerais das estações

Site	Nome	Latitude	Longitude	Canal	Frequência downlink [MHz]	Altitude [m]
CTBA01B	BARÃO DO RIO BRANCO	25° 26' 6,00" S	49° 16' 3,00" W	587	1820,2	900
CTBT01A	BATEL	25° 26' 37,32" S	49° 17' 0,60" W	588	1820,4	922
CTRB01A	REBOUÇAS	25° 26' 42,72" S	49° 15' 49,32" W	589	1820,6	900
CTVO01B	VOLUNTARIOS DA PATRIA	25° 25' 55,92" S	49° 16' 31,08" W	590	1820,8	900
CTBF01A	BRIGADEIRO FRANCO	25° 26' 7,08" S	49° 16' 53,04" W	591	1821,0	909
CTPV01A	PRADO VELHO	25° 26' 44,16" S	49° 15' 16,92" W	592	1821,2	900
CTJN01C	JOAO NEGRAO	25° 25' 47,28" S	49° 16' 3,72" W	593	1821,4	900
CTAM01B	AMINTAS DE BARROS	25° 25' 38,28" S	49° 15' 48,6" W	594	1821,6	900
CTDK01A	DAKOTA	25° 26' 6,36" S	49° 16' 19,56" W	595	1821,8	901
CTTE01C	TEATRO GUAIRA	25° 25' 51,60" S	49° 15' 48,6" W	596	1822,0	900
CTEB01C	ÉBANO PEREIRA	25° 25' 41,88" S	49° 16' 30,00" W	597	1822,2	920
CTJN01B	JOAO NEGRAO	25° 25' 47,28" S	49° 16' 3,72" W	598	1822,4	900
CTEU01C	HOTEL EDUARDO VII	25° 25' 48,72" S	49° 16' 21,00" W	599	1822,6	903
CTDF01A	DOUTOR FAIVRE	25° 25' 51,60" S	49° 15' 32,04" W	600	1822,8	900
CTMF01A	MARECHAL FLORIANO	25° 26' 32,28" S	49° 16' 1,56" W	601	1823,0	901
CTDK01C	DAKOTA	25° 26' 6,36" S	49° 16' 19,56" W	602	1823,2	901
CTDF01C	DOUTOR FAIVRE	25° 25' 51,60" S	49° 15' 32,04" W	603	1823,4	900
CTRF01C	RODOFERROVIARIA	25° 26' 7,08" S	49° 15' 33,12" W	604	1823,6	900
CTBF01B	BRIGADEIRO FRANCO	25° 26' 7,08" S	49° 16' 53,04" W	605	1823,8	909
CTXV01B	XV DE NOVEMBRO	25° 25' 55,56" S	49° 16' 23,52" W	606	1824,0	900
CTEP01A	EMILIANO PERNETA	25° 26' 15,72" S	49° 16' 40,44" W	607	1824,2	910
CTBA01A	BARÃO DO RIO BRANCO	25° 26' 6,00" S	49° 16' 3,00" W	608	1824,4	900
CTVI01A	RUA 24 DE MAIO	25° 26' 17,88" S	49° 16' 27,48" W	609	1824,6	908
CTRF01A	RODOFERROVIARIA	25° 26' 7,08" S	49° 15' 33,12" W	610	1824,8	900

Na seqüência do desenvolvimento da metodologia, o próximo passo é a análise das características técnicas do sistema irradiante das estações. Essas características técnicas estão sumarizadas na TABELA 3-2 e compreendem, o código da estação (*site*), o azimute (ângulo horizontal direcional da antena), o *tilt* elétrico que no diagrama da antena fornece o ângulo de inclinação vertical, o *tilt* mecânico que é o ângulo de inclinação vertical regulado pelo técnico na instalação, a altura da estação transmissora, o modelo da antena utilizada pela operadora nas estações, o ganho da antena em dBi e dBd, a abertura horizontal da antena, a abertura vertical da antena, o ponto inicial e o final para realizar a filtragem das medidas.

TABELA 3-2 – Características técnicas do sistema irradiante das estações

Site	Azimute [°]	Tilt elétrico [°]	Tilt mecânico [°]	Altura antena [m]	Tipo antena	Ganho antena [dBi]	Ganho antena [dBd]	Abertura horizontal da antena [°]	Abertura vertical da antena [°]	Ponto inicial [m]	Ponto final [m]
CTBA01B	120	3	4	47	742212	17.7	15.55	65	6.7	257	737
CTBT01A	85	0	0	18	742266	17.8	15.65	67	7.0	294	2000
CTRB01A	0	2	2	24	742212	17.7	15.55	65	6.7	186	2115
CTVO01B	100	2	4	42	742212	17.7	15.55	65	6.7	255	907
CTBF01A	50	3	4	40	742212	17.7	15.55	65	6.7	219	627
CTPV01A	0	2	2	35	742212	17.7	15.55	65	6.7	271	3085
CTJN01C	210	4	2	40	742212	17.7	15.55	65	6.7	243	864
CTAM01B	180	4	2	30	742212	17.7	15.55	65	6.7	182	648
CTDK01A	0	2	3	27	742212	17.7	15.55	65	6.7	184	937
CTTE01C	240	2	4	30	742212	17.7	15.55	65	6.7	182	648
CTEB01C	240	2	3	24	742212	17.7	15.55	65	6.7	164	833
CTJN01B	110	4	4	40	742212	17.7	15.55	65	6.7	199	492
CTEU01C	210	6	4	73	742212	17.7	15.55	65	6.7	308	626
CTDF01A	40	2	3	35	742212	17.7	15.55	65	6.7	238	1215
CTMF01A	0	2	3	30	742212	17.7	15.55	65	6.7	204	1041
CTDK01C	240	3	3	27	742212	17.7	15.55	65	6.7	164	583
CTDF01C	280	2	3	35	742212	17.7	15.55	65	6.7	238	1215
CTRF01C	240	2	4	30	742212	17.7	15.55	65	6.7	182	648
CTBF01B	110	3	4	40	742212	17.7	15.55	65	6.7	219	627
CTXV01B	110	2	3	15	742266	17.8	15.65	67	7.0	102	521
CTEP01A	10	6	4	60	742212	17.7	15.55	65	6.7	253	515
CTBA01A	350	3	4	47	742212	17.7	15.55	65	6.7	257	737
CTVI01A	10	2	4	42	742212	17.7	15.55	65	6.7	255	907
CTRF01A	0	2	4	30	742212	17.7	15.55	65	6.7	182	648

Como a potência, além de ser um dos elementos mais importantes do projeto, também é um dos principais entraves, uma vez que níveis indesejados de potência podem causar interferência em outros sistemas, à base de dados do projetista não poderia deixar de conter as características técnicas do sistema de potência das estações. A TABELA 3-3 sumariza e apresenta a potência do amplificador em dBm, as perdas nos cabos da estação transmissora, as perdas na transmissão, as perdas nos conectores e finalmente o nível ERP (potência efetiva de irradiação com relação a dipolo) tanto em dBm quanto em watts.

TABELA 3-3 - Características técnicas do sistema de potência das estações

Site	Potência do amplificador [dBm]	Perdas nos cabos [dB]	Perdas de transmissão [dB]	Perdas de conexão [dB]	ERP [dBm]	ERP [W]
CTBA01B	48,13	4,0	5,7	2	51,9	156,35
CTBT01A	48,13	2,3	5,7	2	53,8	238,84
CTRB01A	48,13	2,7	5,7	2	53,3	214,84
CTVO01B	48,13	3,7	5,7	2	52,2	167,54
CTBF01A	48,13	3,6	5,7	2	52,4	172,23
CTPV01A	48,13	3,3	5,7	2	52,7	184,55
CTJN01C	48,13	3,6	5,7	2	52,4	172,23
CTAM01B	48,13	3,0	5,7	2	53,0	197,75
CTDK01A	48,13	2,8	5,7	2	53,1	206,12
CTTE01C	48,13	3,0	5,7	2	53,0	197,75
CTEB01C	48,13	2,7	5,7	2	53,3	214,84
CTJN01B	48,13	3,6	5,7	2	52,4	172,23
CTEU01C	48,13	3,7	5,7	2	52,3	169,44
CTDF01A	48,13	3,3	5,7	2	52,7	184,55
CTMF01A	48,13	3,0	5,7	2	53,0	197,75
CTDK01C	48,13	2,8	5,7	2	53,1	206,12
CTDF01C	48,13	3,3	5,7	2	52,7	184,55
CTRF01C	48,13	3,0	5,7	2	53,0	197,75
CTBF01B	48,13	3,6	5,7	2	52,4	172,23
CTXV01B	48,13	3,2	5,7	2	52,9	194,36
CTEP01A	48,13	4,8	5,7	2	51,2	130,65
CTBA01A	48,13	4,0	5,7	2	51,9	156,35
CTVI01A	48,13	3,7	5,7	2	52,2	167,54
CTRF01A	48,13	3,0	5,7	2	53,0	197,75

O sexto e o sétimo blocos representam o *loop* que mostra a construção da base de dados com os valores medidos do sinal em cada coordenada. O procedimento simplificado realizado pela operadora para a obtenção dos dados seguiu a seguinte sistemática:

- (1) Definição da rota de realização do *drive-test*, que pode ser observada na FIGURA 3-4.
- (2) Um celular com antena sem ganho de recepção e a 1,5 metros do solo faz a medida do sinal recebido para cada um dos canais (587 a 610) na mesma coordenada.

(3) Os sinais medidos foram enviados para análise, processamento e organização pelo *software TEMS* da *ERICSON*, onde foi gerado um arquivo no formato texto.

Para o interfaceamento das ferramentas de predição e de calibração com a base de dados foram gerados arquivos texto envolvendo tanto a base de dados de transmissão quanto à base de dados de recepção (dados medidos), para cada uma das estações e seus respectivos canais totalizando em cada arquivo 31.493 medidas realizadas para cada uma das 24 estações. O oitavo bloco representa a criação dos arquivos texto.

3.4 DIMENSIONAMENTO DO ESTUDO

Após a geração dos arquivos texto, estes foram usados para a criação das estações no *software* de predição.

3.4.1 INSERÇÃO DAS ESTAÇÕES TRANSMISSORAS

O nono e o décimo blocos representam o *loop* de criação das estações no software de predição. Utilizando os arquivos texto com a base de dados de transmissão, as 24 estações foram criadas. A FIGURA 3-7 mostra a criação de uma das 24 estações, plotadas no centro de Curitiba.

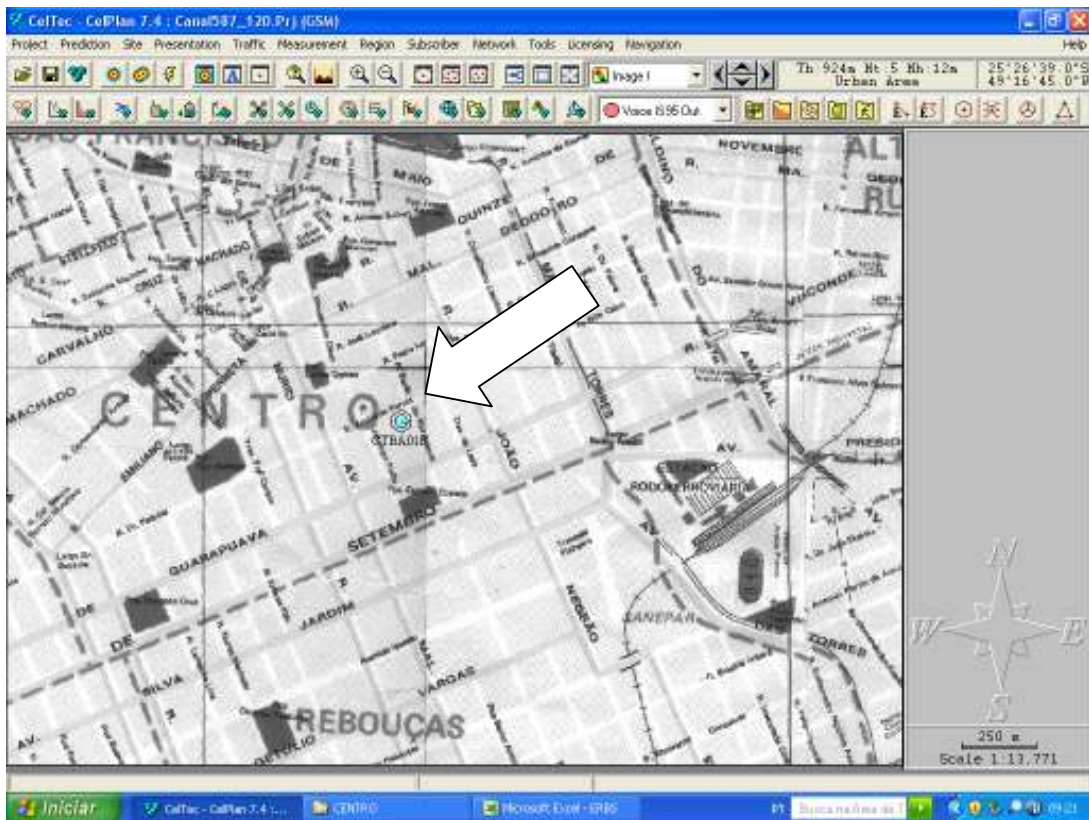


FIGURA 3-7 – Estação transmissora plotada no centro de Curitiba

A FIGURA 3-8 sumariza algumas das características técnicas da estação CTBA01B ($25^{\circ} 26' 6,00''$ S e $49^{\circ} 16' 3,00''$ W) desta estação. Nesta fase de inserção, qualquer modelo de propagação pode ser utilizado. Para o caso desta estação foi utilizado o modelo I.

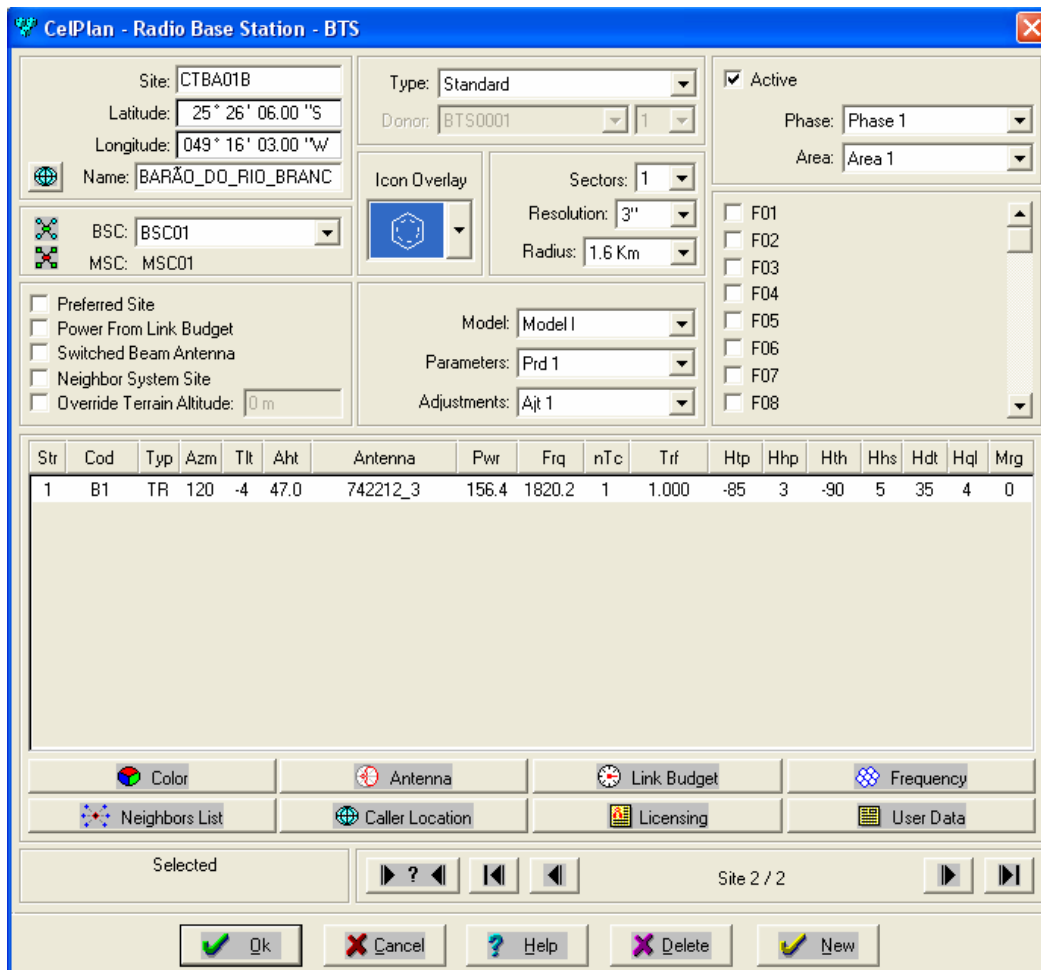


FIGURA 3-8 – Características técnicas da estação transmissora

3.4.2 MODELOS DE PROPAGAÇÃO

Após a criação das estações, o décimo primeiro bloco apresenta a definição dos modelos de propagação utilizados na análise para concepção da metodologia de projeto. Foram utilizados os modelos de predição I, II e IV para realização das estimativas do nível de sinal recebido em cada coordenada. As justificativas para escolha e uso dos mesmos são feitas a seguir.

3.4.2.1 Modelo I

Emprega expressões para predição de nível de sinal de rádio frequência, baseado nos modelos de *Lee*.

Este modelo utiliza a abordagem de Lee para a predição da atenuação do nível de sinal devida à morfologia e a abordagem de Piquenard para a predição da atenuação devida ao fenômeno de difração por múltiplos gumes de faca. A análise de obstrução não considera a morfologia, mas apenas as altitudes do terreno.

Um dos diferenciais do modelo I é também o fato do mesmo considerar todas as morfologias no percurso.

Para a análise da propagação, o percurso é subdividido em duas faixas de distância:

- Da estação transmissora até 1,6 km (1 milha), um conjunto de parâmetros é considerado, como por exemplo P_o , potência de recepção no ponto de inserção [dBm], tal como visto no item 2.4.4.
- Para distâncias acima de 1,6 km (1 milha), outro conjunto de parâmetros são considerados como por exemplo γ , decaimento da atenuação de propagação ou fator de rugosidade do terreno [dB/década], tal como visto no item 2.4.4.

Valores estes empíricos que podem ter como referência a TABELA 2-1.

Como anteriormente dito o modelo I considera todas as obstruções presentes no perfil do terreno situado ao longo do caminho entre a estação transmissora e a estação receptora, que se comportam como gume de faca e que porventura possam vir a obstruir uma parte da região compreendida pelo primeiro elipsóide de Fresnel. A FIGURA 3-9 apresenta os parâmetros de predição com seus valores gerais empíricos. Como a morfologia é considerada, as distâncias são então dispostas de 100 em 100 metros. Um outro fator considerado é a planicidade da região em estudo, o que leva, neste modelo, a se considerar os fatores de altura de antena, tanto do *site* quanto do assinante como sendo igual a um.

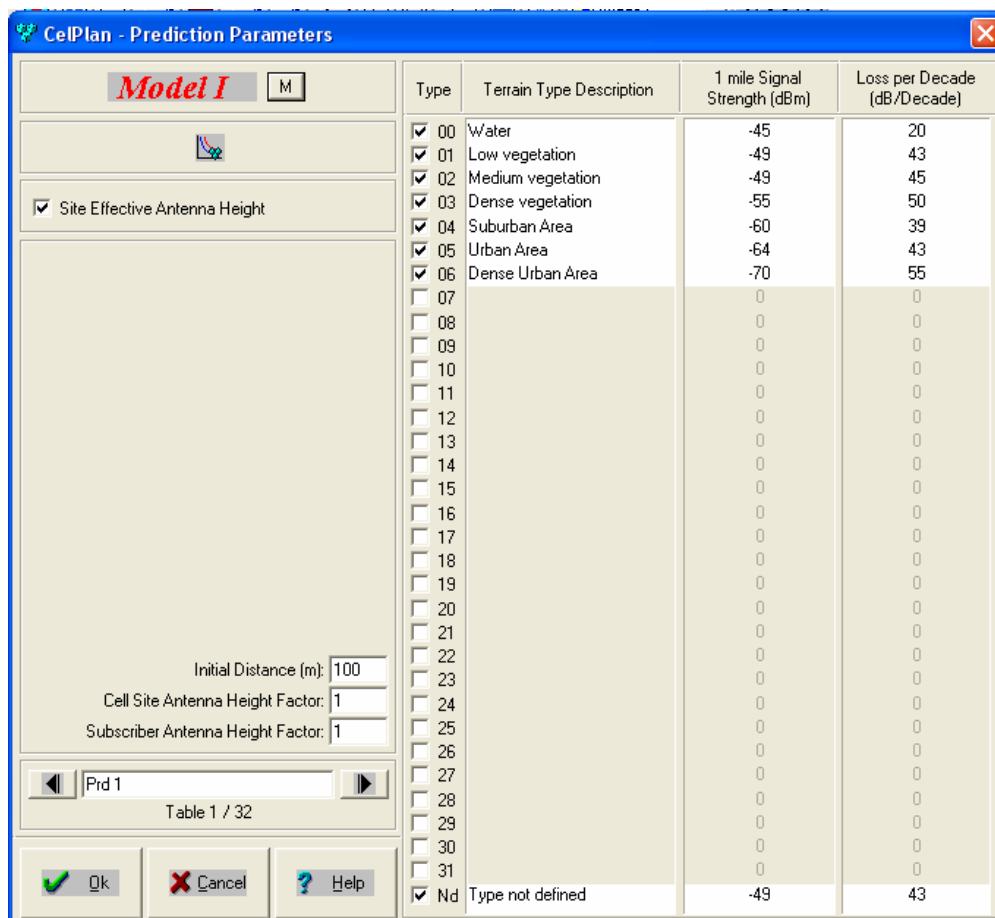


FIGURA 3-9 – Modelo I de predição e seus respectivos parâmetros

3.4.2.2 Modelo II

Denominado modelo de *Korowajczuk*, este emprega expressões para predição do nível de sinal de RF, desenvolvidas e validadas experimentalmente pela empresa desenvolvedora da ferramenta de predição. Trata-se de um modelo proprietário, altamente dependente de medidas realizadas, a priori, sobre a área geográfica de interesse. Baseado no modelo COST 231.

Este modelo considera várias características de propagação e a morfologia. A propagação em espaço livre é assumida sempre que o elipsóide correspondente à 1ª zona de *Fresnel* não toca qualquer elemento morfológico no percurso entre a estação transmissora e receptora. A perda sobre a morfologia representa a perda devido à propagação sobre edifícios ou topos de árvores. Ela é linear com a distância, ou seja, fornecida em dB/km.

Este modelo considera a morfologia como uma obstrução à propagação, todavia levando em conta que essa obstrução não é tão severa quanto àquela proporcionada por um obstáculo do tipo gume de faca. Por este motivo, um fator de arredondamento é aplicado para ajustar o valor de atenuação do sinal devido à difração. A propagação dentro da morfologia é definida pela perda de penetração, que abrange as perdas de difração, de reflexão e de multipercurso local. A perda de penetração somente é aplicada quando a altura da antena da estação receptora se encontra abaixo da morfologia local.

Este modelo considera para cada ponto estimado todas as morfologias presentes no trajeto entre a estação transmissora e a estação receptora, bem como suas respectivas alturas, além de levar em conta também a perda por difração, as margens de desvanecimento e as características da estação transmissora e receptora. A equação 3.1 representa a potência recebida na estação móvel.

$$P_{EM} = P_{EI} - (K + L_o + L_p + L_m + \alpha L_d) + G_m \quad (3.1)$$

Onde,

P_{EM} – potência recebida na estação receptora [dBm];

P_{EI} – potência efetivamente irradiada na antena da estação transmissora [dBm];

K – fator dependente da altura da antena transmissora, de parâmetros da antena empregada, faixa de frequência;

L_o - Perda por propagação até a fronteira do campo próximo [dB];

L_p - perda de penetração em morfologia local do topo até a estação receptora [dB];

L_m - perda total devida à presença de morfologia [km];

α – fator de obstrução;

L_d – perda total de difração de onda [dB];

G_m – ganho antena receptora [dBd].

A FIGURA 3-10 assim como para o modelo I, sumariza os parâmetros de predição com seus valores gerais empíricos para diversas morfologias como água, vegetação baixa, vegetação média, vegetação densa, área suburbana, área urbana e área urbana densa, bem como mostra a distância inicial igual a 100 m, que é a fronteira para início da medição do campo distante. O fator de arredondamento dos gumes de telhado para difração pode variar

entre 0 e 1, para o caso da FIGURA 3-10 foi utilizado o valor 1 por tratar-se do pior caso. Já o fator de perda por propagação é expresso em dB por década, sendo que seus valores usuais variam entre 10 e 30 dB por década. No caso específico desta mesma figura foi utilizado o valor de 23 dB por década.

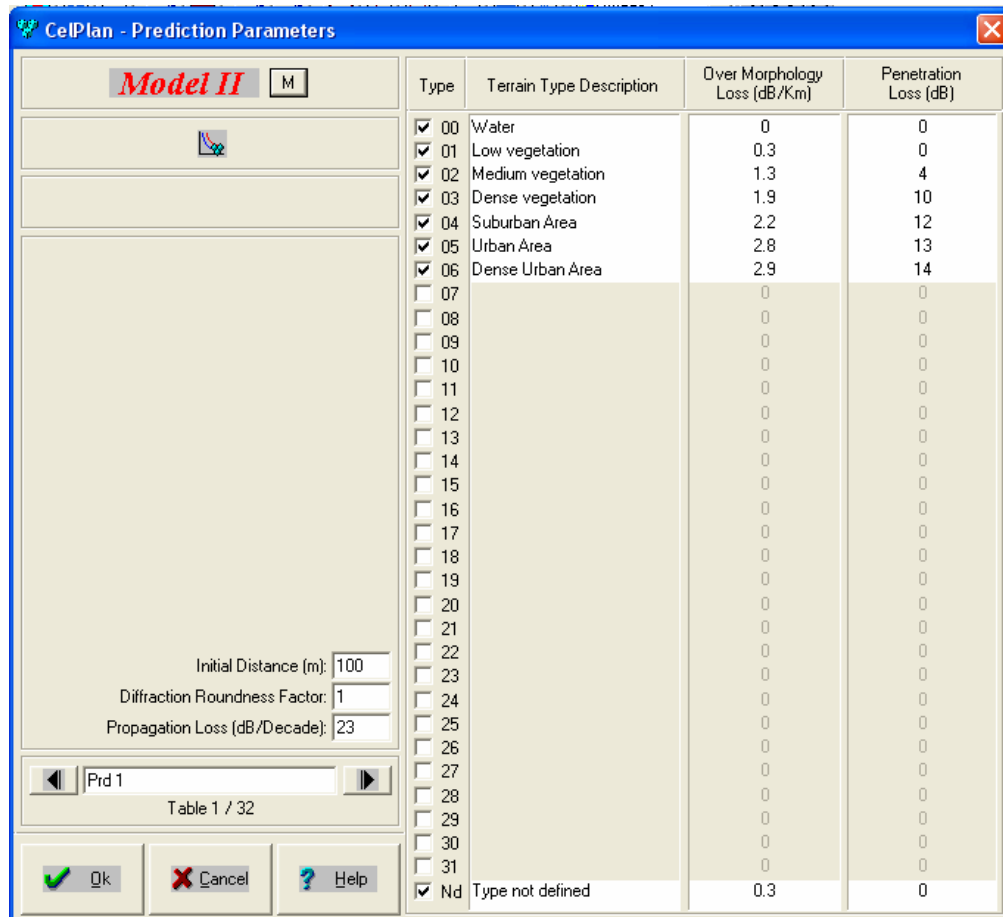


FIGURA 3-10 - Modelo II de predição e seus respectivos parâmetros

3.4.2.3 Modelo IV

Pressupõem o modelamento sugerido por Erceg levando em consideração a base de dados de topografia e de morfologia, as indicações de alturas de elementos físicos (prédios e árvores) e possibilidade de uso em diferentes faixas de frequência. Sugere-se a releitura do item 2.4.5 para as compreensão dos valores de Pa, Pb e Pc, respectivamente.

A FIGURA 3-11 mostra os parâmetros do modelo para as diversas morfologias, bem como a distância inicial igual a 100 metros, que é a fronteira para início das medidas de campo distante. O fator de correção, é utilizado quando o valor de referência de frequência (1800 MHz) é diferente do valor de frequência do projeto em estudo (1800 MHz), neste caso observa-se que o mesmo é zero. O fator de correção de altura da antena do assinante segue o mesmo procedimento sendo que desta vez a correlação se dá entre a altura da antena do assinante (1,5 metros) com a altura de referência da antena do assinante (1,5 metros), neste caso também é igual à zero.

Type	Terrain Type Description	Pa	Pb (m ⁻¹)	Pc (m)
<input checked="" type="checkbox"/> 00	Water	1.59	0.0003	34.9
<input checked="" type="checkbox"/> 01	Low vegetation	1.97	0.0012	32.13
<input checked="" type="checkbox"/> 02	Medium vegetation	2.7	0.003	26.68
<input checked="" type="checkbox"/> 03	Dense vegetation	3.44	0.0048	21.24
<input checked="" type="checkbox"/> 04	Suburban Area	3.6	0.005	20
<input checked="" type="checkbox"/> 05	Urban Area	4	0.0065	17.1
<input checked="" type="checkbox"/> 06	Dense Urban Area	4.6	0.0075	12.6
<input type="checkbox"/> 07		0	0	0
<input type="checkbox"/> 08		0	0	0
<input type="checkbox"/> 09		0	0	0
<input type="checkbox"/> 10		0	0	0
<input type="checkbox"/> 11		0	0	0
<input type="checkbox"/> 12		0	0	0
<input type="checkbox"/> 13		0	0	0
<input type="checkbox"/> 14		0	0	0
<input type="checkbox"/> 15		0	0	0
<input type="checkbox"/> 16		0	0	0
<input type="checkbox"/> 17		0	0	0
<input type="checkbox"/> 18		0	0	0
<input type="checkbox"/> 19		0	0	0
<input type="checkbox"/> 20		0	0	0
<input type="checkbox"/> 21		0	0	0
<input type="checkbox"/> 22		0	0	0
<input type="checkbox"/> 23		0	0	0
<input type="checkbox"/> 24		0	0	0
<input type="checkbox"/> 25		0	0	0
<input type="checkbox"/> 26		0	0	0
<input type="checkbox"/> 27		0	0	0
<input type="checkbox"/> 28		0	0	0
<input type="checkbox"/> 29		0	0	0
<input type="checkbox"/> 30		0	0	0
<input type="checkbox"/> 31		0	0	0
<input checked="" type="checkbox"/> Nd	Type not defined	1.97	0.0012	32.13

Initial Distance (m): 100
 Frequency Correction Factor: 0
 Reference Frequency (MHz): 1800
 Subscriber Antenna Height Factor: 0
 Subscriber Reference Antenna Height (m): 1.5

Prd 1
Table 1 / 32

Ok Cancel Help

FIGURA 3-11 – Modelo IV de predição e seus respectivos parâmetros

A TABELA 3-4 sumariza os parâmetros gerais de cada modelo utilizados para a análise e concepção de projeto.

TABELA 3-4 – Parâmetros gerais dos modelos para área urbana e urbana densa de Curitiba

Modelo	Parâmetros de Propagação	Área urbana	Área urbana densa
I - Lee-Piquenard	Sinal a 1,6 km [dBm]	-64,0000	-70,0000
	Perda por década [dB / década]	43,0000	55,0000
II - Korowajczuk	Perda sobre morfologia [dB / km]	2,8000	2,9000
	Perda por penetração [dB]	13,0000	14,0000
IV - Erceg	Pa	4,0000	4,6000
	Pb [m-1]	0,0065	0,0075
	Pc [m]	17,1000	12,6000

Na utilização dos valores medidos deve-se levar em conta na comparação com os valores estimados, quais os dados medidos que são influenciados pela estação em estudo, portanto deve-se realizar uma filtragem destes dados.

3.5 FILTRAGEM

O décimo segundo bloco representa a inserção da base de dados de recepção (gerada nos arquivos texto), bem como a filtragem dos dados dentro deste arquivo para cada uma das estações. Para cada modelo foram gerados 24 arquivos de medidas filtradas. A FIGURA 3-4 mostra as medidas em toda a região. Estas medidas não levam em consideração uma única estação, mas sim, o nível do sinal no ponto medido. Como se considera no estudo as estações de forma individual deve-se considerar apenas pontos medidos dentro do lóbulo principal da antena desta estação. A filtragem consiste então em coletar apenas as medidas que porventura estejam sendo influenciadas por esta estação, isto é, dentro do lóbulo principal da antena.

A FIGURA 3-12 mostra o efeito da filtragem dos 31.493 pontos, onde após a filtragem restaram à quantidade de 1.913 pontos. Na filtragem dos pontos para cada estação foram considerados os seguintes itens extraídos da base de dados de transmissão:

1. Azimute da antena da estação, que neste caso é de 120 graus orientado a partir do norte;
2. Abertura horizontal da antena, que neste caso é de 65 graus;
3. ponto inicial e final de filtragem, neste caso 257 e 737 metros , respectivamente. Este pontos foram calculados considerando a abertura vertical da antena, o *tilt* elétrico (que representa a posição vertical do dipolo na antena) e o *tilt* mecânico (que representa a posição na vertical da antena na instalação).

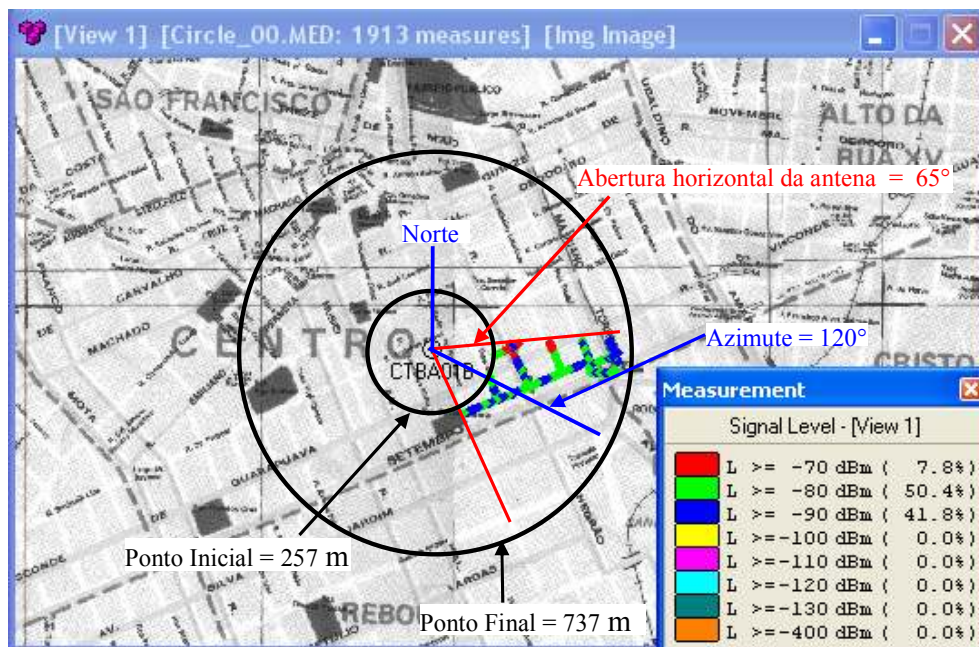


FIGURA 3-12 Filtragem dos dados medido

Após a filtragem obtém-se um arquivo de medidas para cada uma das 24 estações, estes arquivos gerados são inseridos e processados no software de predição como mostrado a seguir.

3.6 INSERÇÃO E PROCESSAMENTO DE MEDIDAS

O décimo terceiro e décimo quarto blocos fazem um *loop* para a inserção dos arquivos com os valores medidos filtrados. O décimo quinto bloco consiste na geração dos arquivos de simulação de modo a possibilitar um comparativo entre os valores preditos com os valores medidos para cada estação. A FIGURA 3-13 mostra a posição dos pontos medidos para uma estação.

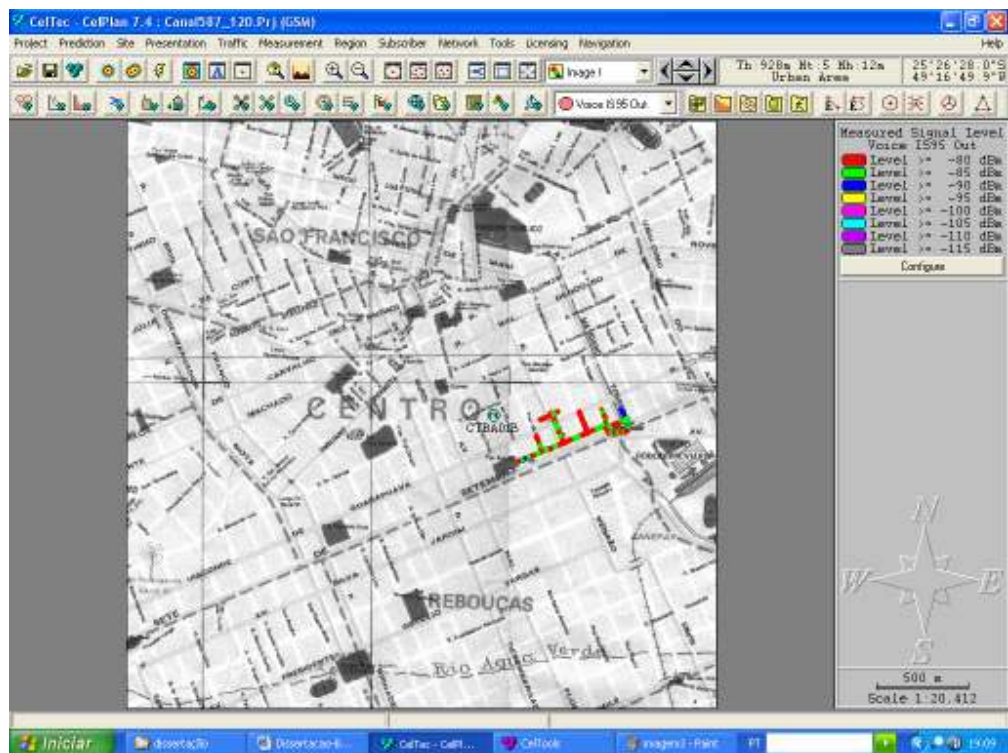


FIGURA 3-13 - Valores medidos filtrados

O décimo sexto bloco é na realidade um divisor de funções, pois por um lado, ele origina o fluxograma da FIGURA 3-2 onde todo o processamento de medidas é realizado considerando-se os três modelos de propagação. Logo, além de todo o processamento (itens 16, 17, 18, 19 e 20 do fluxograma) o bloco 16 permite a montagem das TABELAS 3-5, 3-6 e 3-7, como será mostrado na seqüência deste capítulo. Finalmente após todo o processamento de medidas o bloco 16 permite então a utilização dos valores processados em uma nova etapa de processamento chamada de calibração (etapa 21), como também, será mostrada na seqüência. A FIGURA 3-14 mostra o processamento das medidas de uma estação utilizando-se o modelo I onde os nível de sinal são medidos em dBm. O nível de sinal da predição, a posição, o código e o nome da estação em estudo, as características técnicas desta estação tal como azimute em graus, *tilt* mecânico da antena em graus, o tipo da antena e o *tilt* elétrico em graus, o ERP em watts, a freqüência em MHz, à altura da antena de recepção e finalmente o ganho da antena de recepção são todos valores provenientes dos arquivos texto das bases de dados.

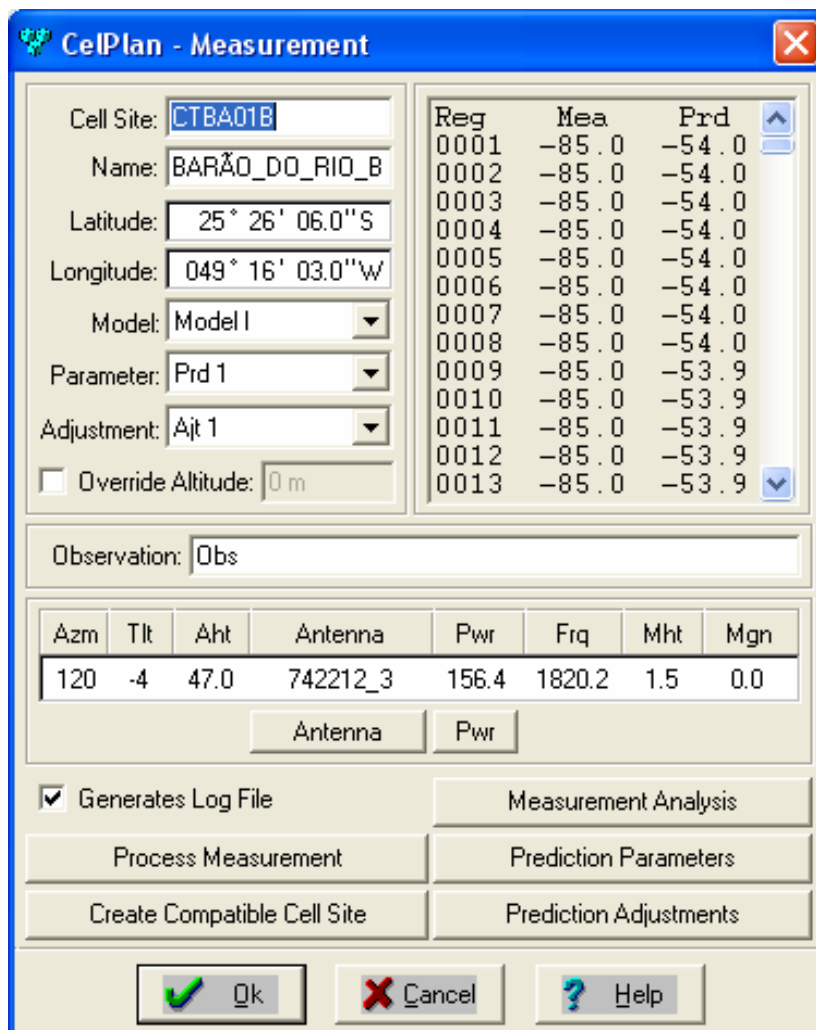


FIGURA 3-14 – Processamento das medidas de uma estação utilizando o modelo I.

A FIGURA 3-15 mostra o processamento das medidas de uma estação utilizando-se o modelo II onde os nível de sinal são medidos em dBm. O nível de sinal da predição, a posição, o código e o nome da estação em estudo, as características técnicas desta estação tal como azimute em graus, *tilt* mecânico da antena em graus, o tipo da antena e o *tilt* elétrico em graus, o ERP em watts, a frequência em MHz, à altura da antena de recepção e finalmente o ganho da antena de recepção são todos valores provenientes dos arquivos texto das bases de dados.

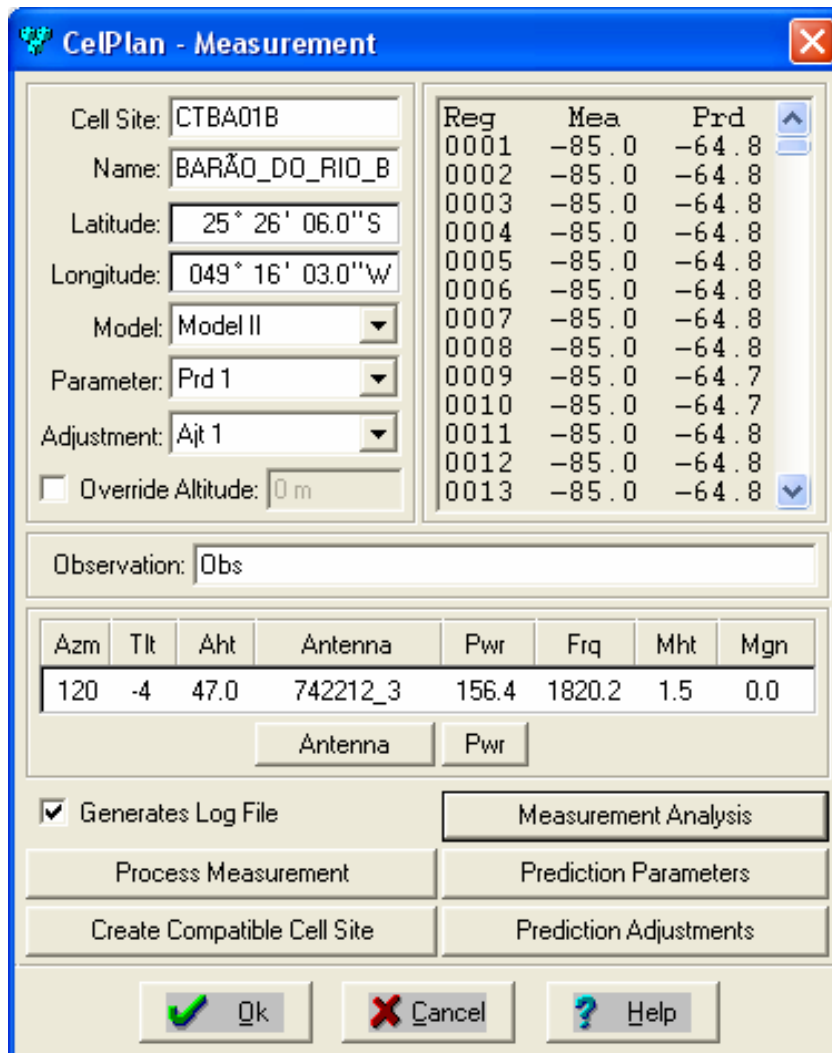


FIGURA 3-15 – Processamento das medidas de uma estação utilizando o modelo II.

A FIGURA 3-16 mostra o processamento das medidas de uma estação utilizando-se o modelo IV onde os nível de sinal são medidos em dBm. O nível de sinal da predição, a posição, o código e o nome da estação em estudo, as características técnicas desta estação tal como azimute em graus, *tilt* mecânico da antena em graus, o tipo da antena e o *tilt* elétrico em graus, o ERP em watts, a frequência em MHz, à altura da antena de recepção e finalmente o ganho da antena de recepção são todos valores provenientes dos arquivos texto das bases de dados.

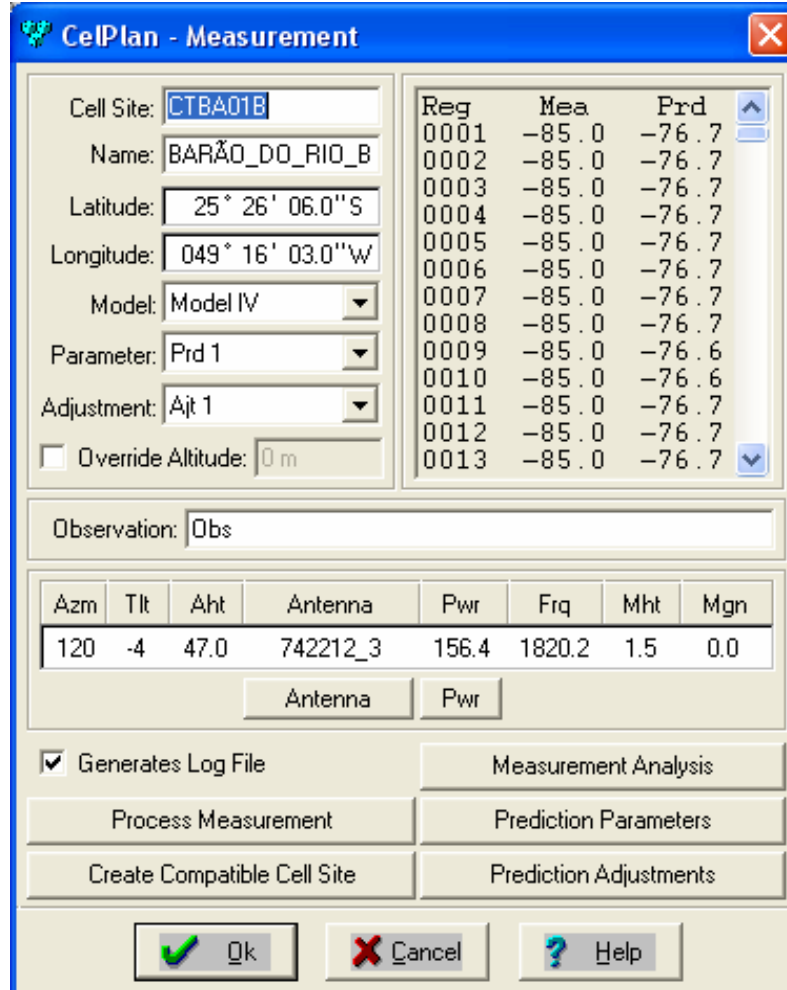


FIGURA 3-16 – Processamento das medidas de uma estação utilizando o modelo IV.

A FIGURA 3-17 apresenta para o modelo I, o processamento dos fatores de correção que podem ser utilizados na predição do sinal como correção da morfologia. Nos casos em que o terreno venha a exercer obstrução, deve-se fracionar a morfologia em lances de 500 em 500 metros de modo que o erro entre as medidas e os valores estimados das mesmas tendam a diminuir. Com este procedimento pode-se também obter o desvio padrão [dB] (com e sem fator de correção), o desvio médio [dB] (com e sem fator de correção). Os desvios neste caso representam dados estatísticos e tem por objetivo a visualização do erro entre as medidas e os valores estimados.

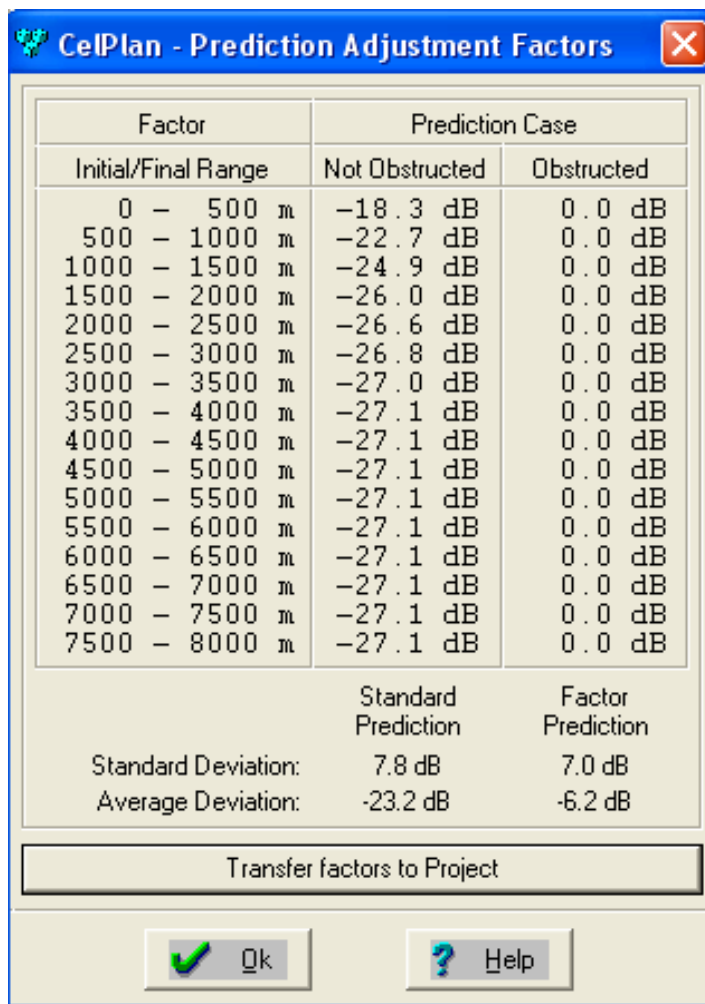


FIGURA 3-17 – Fatores de ajuste e dados estatísticos de predição utilizando o modelo I

A FIGURA 3-18 apresenta para o modelo II, o processamento dos fatores de correção que podem ser utilizados na predição do sinal como correção da morfologia. Nos casos em que o terreno venha a exercer obstrução, deve-se fracionar a morfologia em lances de 500 em 500 metros de modo que o erro entre as medidas e os valores estimados das mesmas tendam a diminuir. Com este procedimento pode-se também obter o desvio padrão [dB] (com e sem fator de correção), o desvio médio [dB] (com e sem fator de correção). Os desvios neste caso representam dados estatísticos e tem por objetivo a visualização do erro entre as medidas e os valores estimados.

Factor Initial/Final Range	Prediction Case	
	Not Obstructed	Obstructed
0 – 500 m	-15.2 dB	-15.9 dB
500 – 1000 m	-15.2 dB	-16.2 dB
1000 – 1500 m	-15.2 dB	-16.3 dB
1500 – 2000 m	-15.2 dB	-16.4 dB
2000 – 2500 m	-15.2 dB	-16.4 dB
2500 – 3000 m	-15.2 dB	-16.4 dB
3000 – 3500 m	-15.2 dB	-16.4 dB
3500 – 4000 m	-15.2 dB	-16.4 dB
4000 – 4500 m	-15.2 dB	-16.5 dB
4500 – 5000 m	-15.2 dB	-16.5 dB
5000 – 5500 m	-15.2 dB	-16.5 dB
5500 – 6000 m	-15.2 dB	-16.5 dB
6000 – 6500 m	-15.2 dB	-16.5 dB
6500 – 7000 m	-15.2 dB	-16.5 dB
7000 – 7500 m	-15.2 dB	-16.5 dB
7500 – 8000 m	-15.2 dB	-16.5 dB

	Standard Prediction	Factor Prediction
Standard Deviation:	4.9 dB	5.4 dB
Average Deviation:	-16.0 dB	-2.0 dB

Transfer factors to Project

Ok Help

FIGURA 3-18 – Fatores de ajuste e dados estatísticos de predição utilizando o modelo II

A FIGURA 3-19 apresenta para o modelo IV, o processamento dos fatores de correção que podem ser utilizados na predição do sinal como correção da morfologia. Nos casos em que o terreno venha a exercer obstrução, deve-se fracionar a morfologia em lances de 500 em 500 metros de modo que o erro entre as medidas e os valores estimados das mesmas tendam a diminuir. Com este procedimento pode-se também obter o desvio padrão [dB] (com e sem fator de correção), o desvio médio [dB] (com e sem fator de correção). Os desvios neste caso representam dados estatísticos e tem por objetivo a visualização do erro entre as medidas e os valores estimados.

Factor	Prediction Case	
	Initial/Final Range	Not Obstructed
0 - 500 m	-8.1 dB	0.0 dB
500 - 1000 m	-11.2 dB	0.0 dB
1000 - 1500 m	-12.8 dB	0.0 dB
1500 - 2000 m	-13.6 dB	0.0 dB
2000 - 2500 m	-14.0 dB	0.0 dB
2500 - 3000 m	-14.2 dB	0.0 dB
3000 - 3500 m	-14.3 dB	0.0 dB
3500 - 4000 m	-14.3 dB	0.0 dB
4000 - 4500 m	-14.4 dB	0.0 dB
4500 - 5000 m	-14.4 dB	0.0 dB
5000 - 5500 m	-14.4 dB	0.0 dB
5500 - 6000 m	-14.4 dB	0.0 dB
6000 - 6500 m	-14.4 dB	0.0 dB
6500 - 7000 m	-14.4 dB	0.0 dB
7000 - 7500 m	-14.4 dB	0.0 dB
7500 - 8000 m	-14.4 dB	0.0 dB
	Standard Prediction	Factor Prediction
Standard Deviation:	7.3 dB	6.9 dB
Average Deviation:	-11.6 dB	-3.9 dB

Transfer factors to Project

Ok Help

FIGURA 3-19 – Fatores de ajuste e dados estatísticos de predição utilizando o modelo IV

A FIGURA 3-20 apresenta o processamento das medidas utilizando-se o modelo I. Observa-se em uma escala de nível de sinal variando entre -50 a -85 dBm as variações entre os valores simplesmente medidos, os valores estimados sem fator de correção e os valores estimados com fator de correção. O nível de sinal de -110 dBm representa o valor inicial de ruído admissível (*noise threshold*), já o nível de 100 dB representa a diferença máxima entre os valores medidos e os valores estimados (*outlying criteria*) mostra a diferença entre as medidas, os valores estimados sem fatores de correção e os valores estimados com fatores de correção, os níveis de -110 dBm considerado como ruído e 100 dB como a máximo critério de diferença entre os valores medidos e estimados.

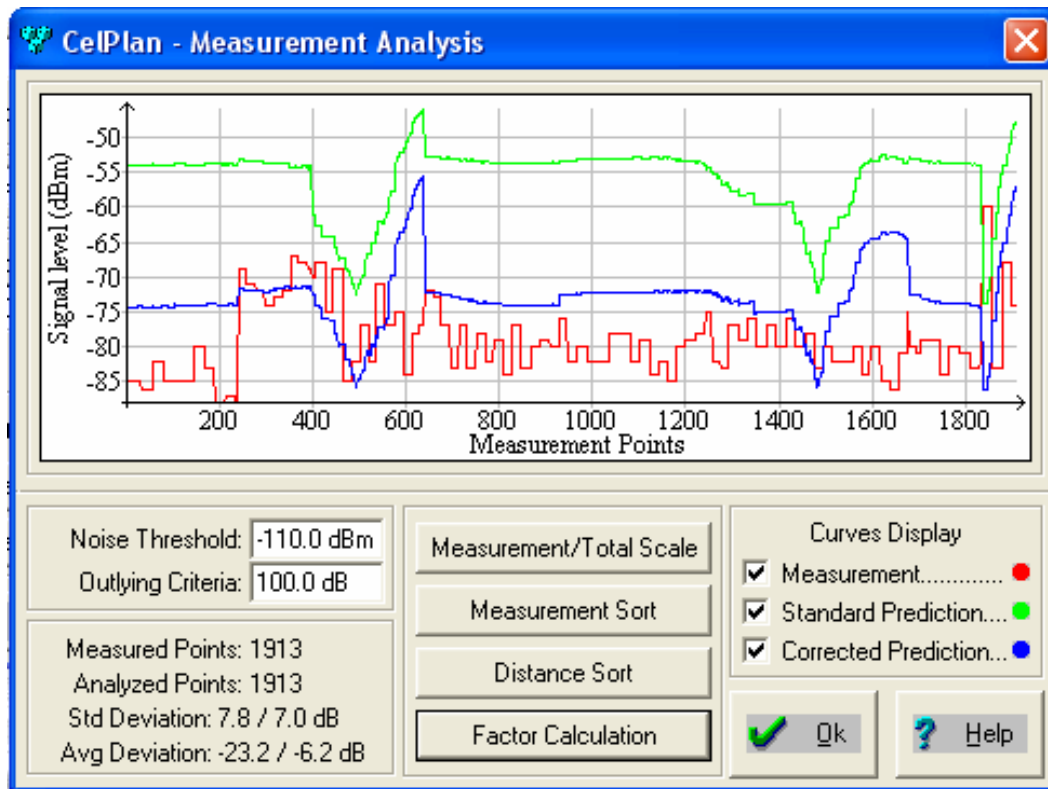


FIGURA 3-20 – Nível de sinal [dBm] por pontos medidos utilizando o modelo I

A FIGURA 3-21 apresenta o processamento das medidas utilizando-se o modelo II. Observa-se em uma escala de nível de sinal variando entre -50 a -85 dBm as variações entre os valores simplesmente medidos, os valores estimados sem fator de correção e os valores estimados com fator de correção. O nível de sinal de -110 dBm representa o valor inicial de ruído admissível (*noise threshold*), já o nível de 100 dB representa a diferença máxima entre os valores medidos e os valores estimados (*outlying criteria*) mostra a diferença entre as medidas, os valores estimados sem fatores de correção e os valores estimados com fatores de correção, os níveis de -110 dBm considerado como ruído e 100 dB como a máximo critério de diferença entre os valores medidos e estimados.

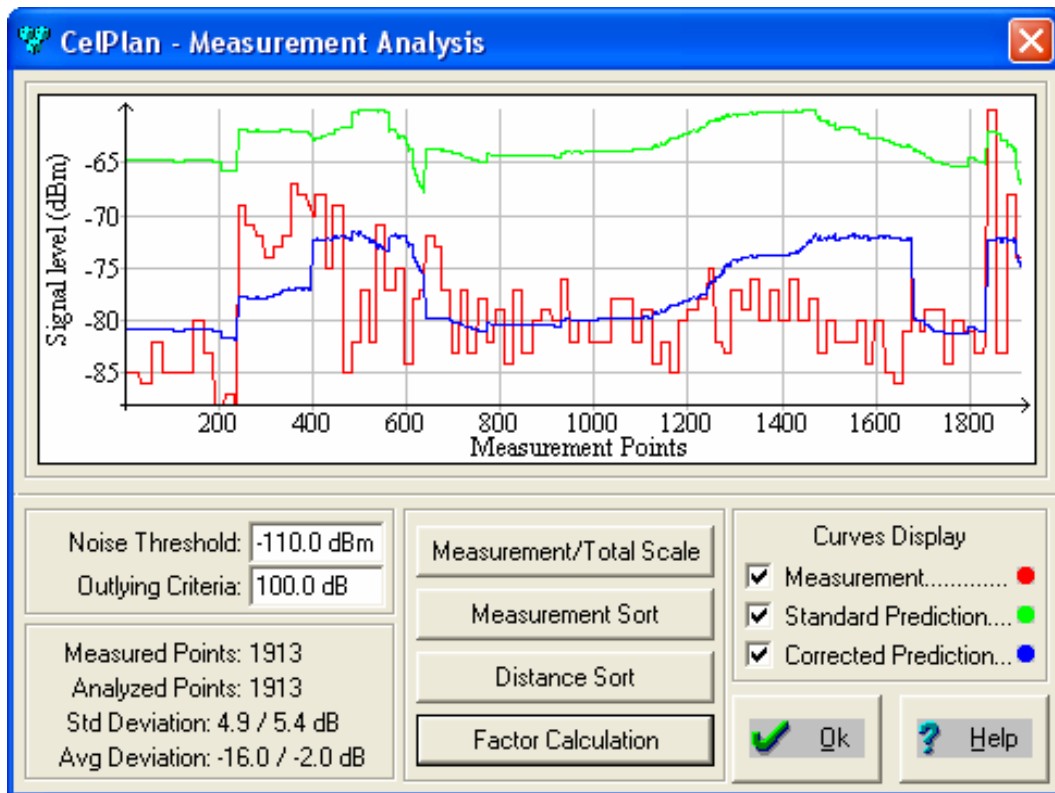


FIGURA 3-21 – Nível de sinal [dBm] por pontos medidos utilizando o modelo II.

A FIGURA 3-22 apresenta o processamento das medidas utilizando-se o modelo IV. Observa-se em uma escala de nível de sinal variando entre -50 a -85 dBm as variações entre os valores simplesmente medidos, os valores estimados sem fator de correção e os valores estimados com fator de correção. O nível de sinal de -110 dBm representa o valor inicial de ruído admissível (*noise threshold*), já o nível de 100 dB representa a diferença máxima entre os valores medidos e os valores estimados (*outlying criteria*) mostra a diferença entre as medidas, os valores estimados sem fatores de correção e os valores estimados com fatores de correção, os níveis de -110 dBm considerado como ruído e 100 dB como a máximo critério de diferença entre os valores medidos e estimados.

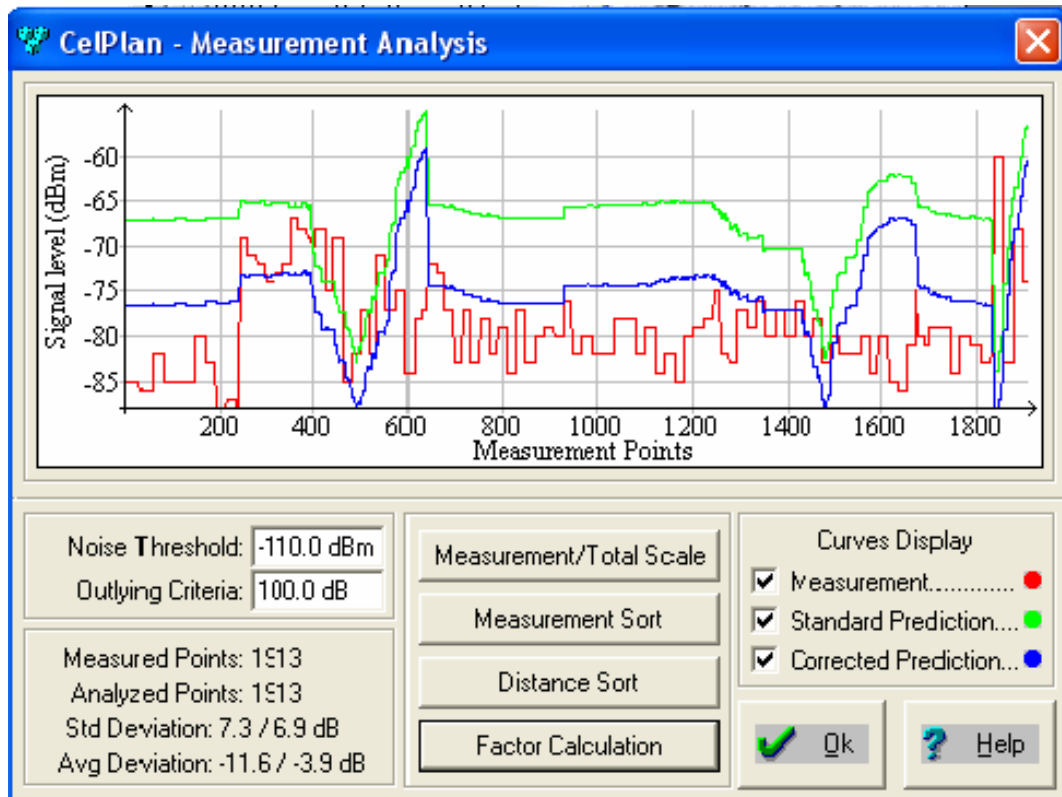


FIGURA 3-22 – Nível de sinal [dBm] por pontos medidos utilizando o modelo IV.

As TABELAS 3-5,3-6 e 3-7 apresentam os resultados dos dados estatísticos de desvio médio e do desvio padrão (com e sem fatores de correção) para os modelos I, II e IV, respectivamente utilizando-se parâmetros gerais. Estes resultados foram obtidos baseados no décimo oitavo bloco do fluxograma apresentado na FIGURA 3-2.

TABELA 3-5 – Valores de desvio padrão e do desvio médio com e sem fatores de correção para o modelo I -parâmetros gerais.

Site	Quantidade de medidas	Modelo I - Lee-Piquenard			
		Sem fatores de correção		Com fatores de correção	
		Desvio padrão [dB]	Desvio médio [dB]	Desvio padrão [dB]	Desvio médio [dB]
CTBA01B	1913	7,80	-23,20	7,00	-6,20
CTBT01A	5791	7,50	-13,20	7,90	1,40
CTRB01A	19788	9,90	-15,10	9,10	3,70
CTVO01B	4918	7,50	-34,40	7,50	-5,40
CTBF01A	2278	14,90	-20,70	13,70	-6,00
CTPV01A	10842	7,40	-12,60	7,30	-0,20
CTJN01C	3714	9,30	-40,00	10,80	-11,80
CTAM01B	3942	9,80	-23,90	8,30	-6,80
CTDK01A	2729	15,50	-34,80	12,90	-26,20
CTTE01C	3292	12,50	-18,30	10,70	-5,20
CTEB01C	1723	9,30	-24,00	7,30	-10,60
CTJN01B	1633	10,70	-23,80	9,10	-6,30
CTEU01C	1101	8,60	-26,90	7,20	6,20
CTDF01A	59	7,20	-14,50	6,60	-6,40
CTMF01A	3403	10,90	-3,50	10,90	1,70
CTDK01C	1899	10,40	-29,90	7,10	-9,10
CTDF01C	9108	11,40	-16,10	11,40	-1,90
CTRF01C	1299	14,30	-4,40	14,10	-5,00
CTBF01B	1413	17,50	-22,40	15,10	-11,20
CTXV01B	1316	11,80	-5,50	12,00	-1,20
CTEP01A	1402	10,60	-21,70	9,20	-4,20
CTBA01A	3451	12,10	-32,70	9,30	-11,60
CTVI01A	3101	15,40	-20,30	12,30	-15,20
CTRF01A	1920	14,00	-10,40	13,10	-6,40
valor médio absoluto[dB]		11,10	20,51	10,00	7,08

TABELA 3-6 – Valores de desvio padrão e do desvio médio com e sem fatores de correção para o modelo II -parâmetros gerais.

Site	Quantidade de medidas	Modelo II - Korowajczuk			
		Sem fatores de correção		Com fatores de correção	
		Desvio padrão [dB]	Desvio médio [dB]	Desvio padrão [dB]	Desvio médio [dB]
CTBA01B	1913	4.90	-16.00	5.40	-2.00
CTBT01A	5791	8.20	19.70	8.60	2.10
CTRB01A	19788	10.10	-1.50	8.80	5.00
CTVO01B	4918	8.60	-23.70	8.50	3.00
CTBF01A	2278	16.50	-10.50	14.40	-2.60
CTPV01A	10842	7.30	0.20	7.30	-0.50
CTJN01C	3714	10.30	-28.60	12.10	-0.40
CTAM01B	3942	8.90	-13.10	8.30	-4.30
CTDK01A	2729	12.20	-27.40	10.20	-20.20
CTTE01C	3292	9.50	-13.30	9.50	-2.20
CTEB01C	1723	5.10	-21.60	4.50	-0.90
CTJN01B	1633	7.10	-19.70	7.20	-5.10
CTEU01C	1101	7.60	-16.10	6.70	-3.70
CTDF01A	59	3.20	-10.80	2.90	-4.80
CTMF01A	3403	13.00	8.80	13.70	7.70
CTDK01C	1899	8.00	-23.90	6.90	-6.80
CTDF01C	9108	14.30	-3.90	13.60	5.10
CTRF01C	1299	11.20	0.00	11.20	-1.90
CTBF01B	1413	16.80	-15.70	12.80	-3.90
CTXV01B	1316	14.40	-4.60	14.80	-0.60
CTEP01A	1402	12.30	-12.90	11.10	-2.50
CTBA01A	3451	9.00	-24.60	7.30	-6.00
CTVI01A	3101	12.00	-14.00	8.60	-8.70
CTRF01A	1920	10.10	-6.40	9.60	-3.50
valor médio absoluto[dB]		10.03	14.04	9.33	4.31

TABELA 3-7 – Valores de desvio padrão e do desvio médio com e sem fatores de correção para o modelo IV -parâmetros gerais.

Site	Quantidade de medidas	Modelo IV - Erceg			
		Sem fatores de correção		Com fatores de correção	
		Desvio padrão [dB]	Desvio médio [dB]	Desvio padrão [dB]	Desvio médio [dB]
CTBA01B	1913	7,30	-11,60	6,90	-3,90
CTBT01A	5791	11,70	29,00	9,20	9,10
CTRB01A	19788	14,10	-1,20	8,80	5,20
CTVO01B	4918	12,70	-15,90	6,10	-2,10
CTBF01A	2278	14,30	-9,90	13,50	-3,80
CTPV01A	10842	7,30	1,10	6,90	0,20
CTJN01C	3714	12,60	-25,20	11,30	-0,40
CTAM01B	3942	9,00	-18,70	8,20	-5,20
CTDK01A	2729	13,40	-23,10	14,10	-17,40
CTTE01C	3292	13,30	-11,40	10,60	-3,30
CTEB01C	1723	6,90	-14,50	5,90	-6,30
CTJN01B	1633	10,20	-15,80	9,20	-4,20
CTEU01C	1101	7,70	-14,50	6,90	-4,50
CTDF01A	59	6,80	-9,70	6,40	-4,30
CTMF01A	3403	16,00	-6,90	17,90	12,60
CTDK01C	1899	9,70	-23,80	7,50	-7,00
CTDF01C	9108	19,10	-1,40	9,50	-1,50
CTRF01C	1299	13,10	0,30	13,40	-3,20
CTBF01B	1413	16,00	-11,10	15,80	-9,00
CTXV01B	1316	14,80	-8,10	12,20	-2,20
CTEP01A	1402	10,00	-9,70	9,30	-2,00
CTBA01A	3451	12,50	-17,80	9,30	-7,80
CTVI01A	3101	14,10	-7,20	11,80	-13,20
CTRF01A	1920	12,60	-5,40	12,30	-9,70
valor médio absoluto [dB]		11,88	12,22	10,13	5,75

O valor médio absoluto [dB] das tabelas apresentadas se refere à média do valor absoluto do desvio padrão e do desvio médio com e sem parâmetros de correção.

Na seqüência será realizada a calibração da morfologia para cada um dos modelos, apresentando novos valores de parâmetro de propagação para a área urbana e urbana densa da região em estudo visando à diminuição do desvio médio e do desvio padrão das medidas, bem como a minimização dos erros.

3.7 CALIBRAÇÃO

Depois de efetuada a filtragem, para garantir a validade dos dados medidos que serão comparados aos dados simulados é realizada a calibração. Basicamente esta se resume a uma aferição da morfologia fornecendo parâmetros compatíveis ao ambiente onde o projeto será executado. Isto é feito através de um algoritmo matemático que depois de várias interações dos arquivos log gerados anteriormente, pelo décimo sétimo bloco, fornece em forma de matriz as equações dos modelos, os valores dos sinais simulados e os valores de sinal medidos. O objetivo então é o de se determinar os parâmetros de propagação do modelo que possibilitaram a diminuição do erro entre o desvio médio e o desvio padrão dos valores medidos e estimados.

O vigésimo primeiro bloco refere-se à inserção dos arquivos log na ferramenta de calibração. Foram inseridos 20 arquivos log, perfazendo um total de 90.991 medidas. No entanto, não foi possível a inserção de mais arquivos devido a uma limitação do programa em 91.000 medidas. Toda a área estudada foi coberta. O tempo de processamento foi de aproximadamente 90 minutos onde se utilizou um Pentium 4 com 1 GB de RAM. Foram processados todos os parâmetros para a área urbana e urbana densa de Curitiba-PR para cada modelo. O vigésimo segundo bloco representa o bloco dos valores obtidos pós processamento para cada modelo. O vigésimo terceiro bloco processa o desejo do conceptor em utilizar ainda mais um modelo ou não.

A FIGURA 3-23 apresenta os resultados de calibração obtidos para o modelo I com a inserção dos arquivos log perfazendo um total de 90.991 medidas, obtendo-se então os parâmetros calibrados referentes ao modelo.

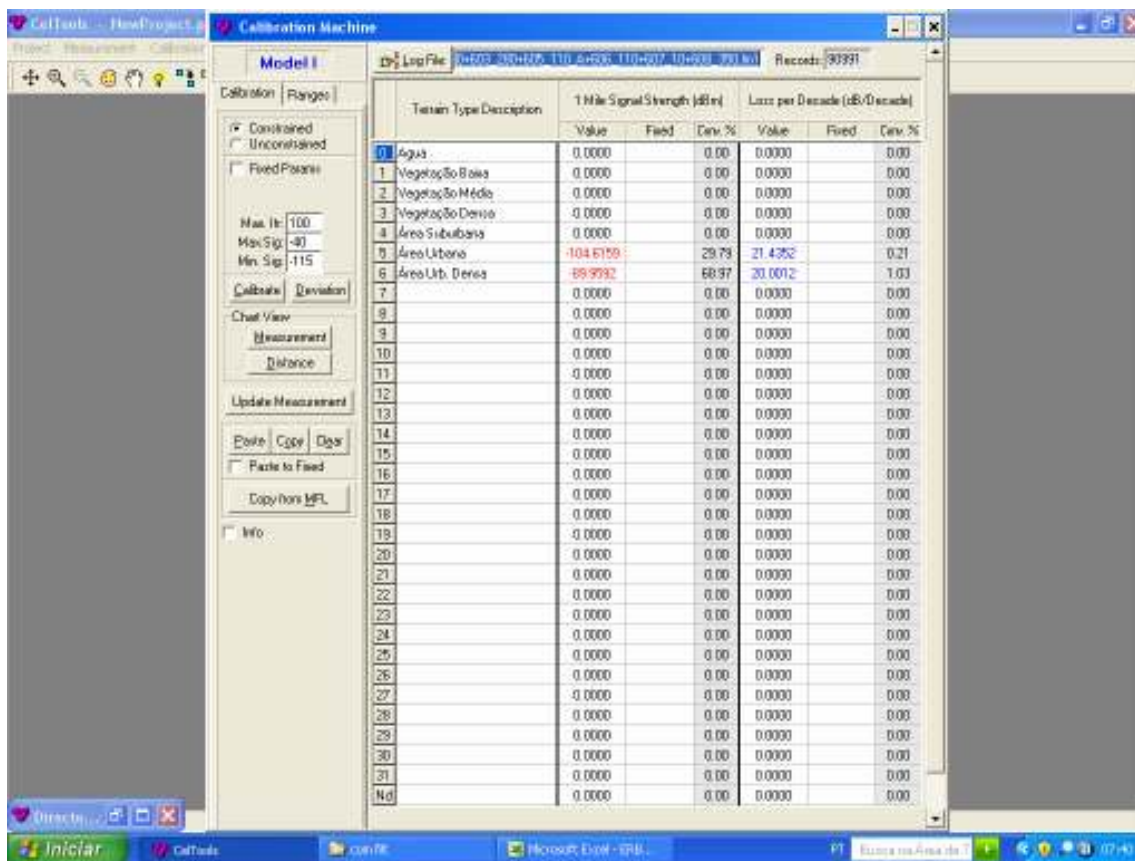


FIGURA 3-23 - Calibração utilizando-se o modelo de propagação I

A FIGURA 3-24 apresenta os resultados de calibração obtidos para o modelo II com a inserção dos arquivos log perfazendo um total de 90.991 medidas, obtendo-se então os parâmetros calibrados referentes ao modelo, neste caso foi encontrado também o fator de arredondamento dos gumes de telhado para difração igual a 0,0008 e o fator da perda de propagação característica em dB/década igual a 21,9060 dB/década.

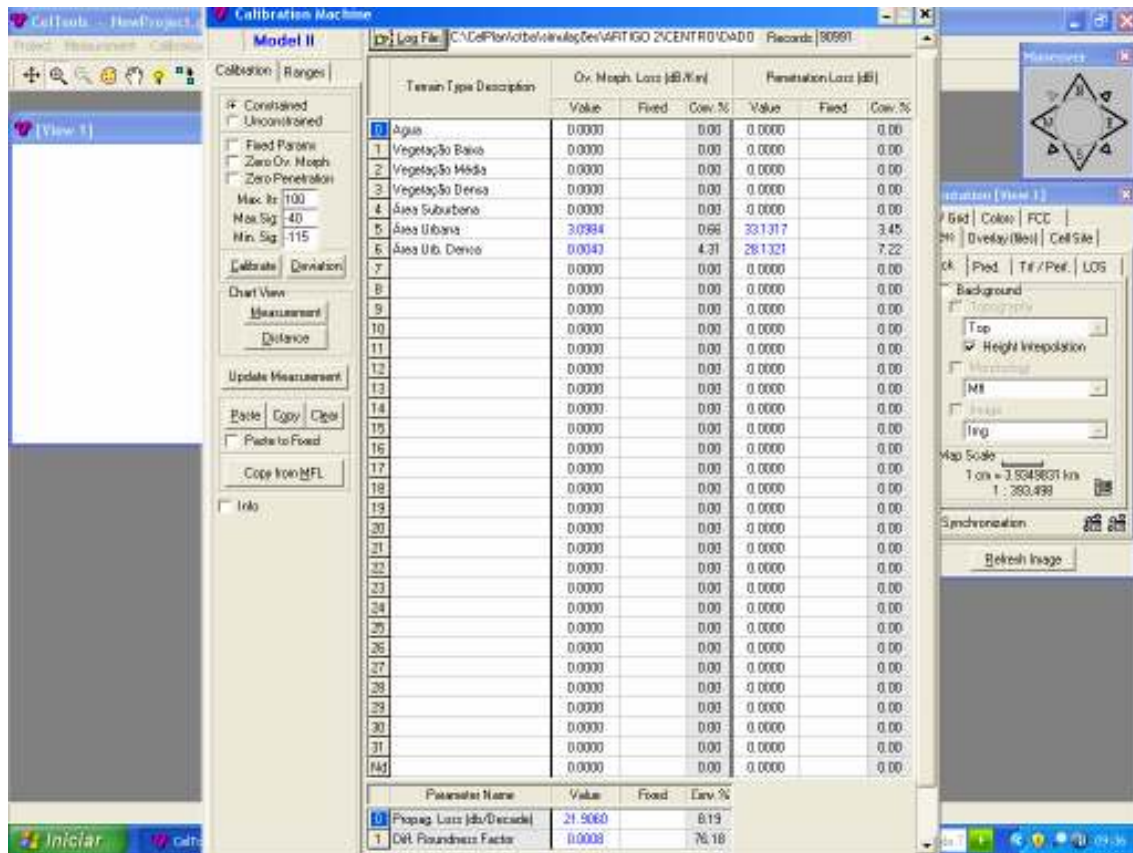


FIGURA 3-24 - Calibração utilizando-se o modelo de propagação II

A FIGURA 3-25 apresenta os resultados de calibração obtidos para o modelo IV com a inserção dos arquivos log perfazendo um total de 90.991 medidas, obtendo-se então os parâmetros calibrados referentes ao modelo.

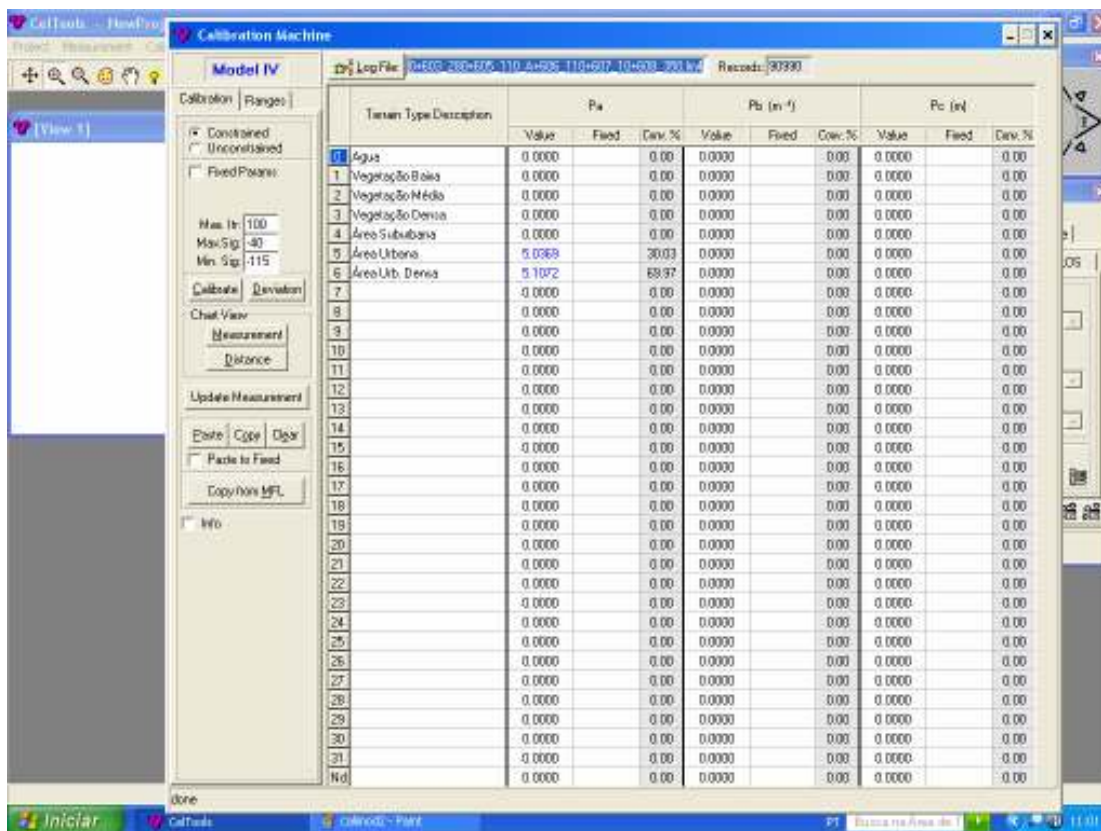


FIGURA 3-25 - Calibração utilizando-se o modelo de propagação IV

A TABELA 3-8 sumariza os valores dos parâmetros de propagação encontrados na calibração que passaram a se chamar de parâmetros calibrados para cada um dos modelos na predição tanto para a área urbana quanto para a região urbana densa de Curitiba –PR.

TABELA 3-8 – Parâmetros calibrados dos modelos para área urbana e urbana densa de Curitiba

Modelo	Parâmetros de Propagação	Área urbana	Área urbana densa
I - Lee-Piquenard	Sinal a 1,6 km [dBm]	-104,6159	-89,9592
	Perda por década [dB / década]	21,4352	20,0012
II - Korowajczuk	Perda sobre morfologia [dB / km]	3,0900	0,0043
	Perda por penetração [dB]	33,1317	28,1321
IV - Erceg	Pa	5,0369	5,1072
	Pb [m ⁻¹]	0,0000	0,0000
	Pc [m]	0,0000	0,0000

3.8 PROCESSAMENTO COM OS PARÂMETROS CALIBRADOS

O vigésimo quarto bloco realiza o processamento das medidas com os parâmetros de propagação calibrados para os modelos. Pode-se realizar os procedimentos de processamento

de medidas de forma similar ao executado anteriormente, porém utilizando os parâmetros de propagação calibrados para cada modelo, mostrados na TABELA 3-8. O vigésimo sexto bloco representa o *loop* para as 24 estações e o vigésimo sétimo bloco o loop para os três modelos. O vigésimo quinto bloco obtém os valores estatísticos de desvio médio e desvio padrão usando os parâmetros de propagação calibrados.

As TABELAS 3-9, 3-10 e 3-11 apresentam os resultados dos dados estatísticos de desvio médio e do desvio padrão (com e sem fatores de correção) para os modelos I, II e IV, respectivamente utilizando-se parâmetros calibrados. Estes resultados foram obtidos baseados no vigésimo quinto bloco do fluxograma apresentado na FIGURA 3-3.

TABELA 3-9 – Valores de desvio padrão e do desvio médio com e sem fatores de correção para o modelo I -parâmetros calibrados.

Site	Quantidade de medidas	Modelo I - Lee-Piquenard			
		Sem fatores de correção		Com fatores de correção	
		Desvio padrão [dB]	Desvio médio [dB]	Desvio padrão [dB]	Desvio médio [dB]
CTBA01B	1913	7,00	-11,60	6,90	-3,20
CTBT01A	5791	7,40	18,50	8,20	4,80
CTRB01A	19788	9,90	3,50	8,40	5,60
CTVO01B	4918	6,30	-9,50	6,50	0,40
CTBF01A	2278	13,60	0,30	13,60	-1,20
CTPV01A	10842	7,60	4,10	7,50	-0,90
CTJN01C	3714	9,40	-18,80	10,50	5,50
CTAM01B	3942	8,80	-13,60	8,20	-4,20
CTDK01A	2729	11,90	-8,10	12,20	-18,30
CTTE01C	3292	11,30	-8,00	10,70	-2,30
CTEB01C	1723	6,50	1,80	6,70	-4,70
CTJN01B	1633	9,90	-15,00	9,10	-4,00
CTEU01C	1101	6,60	-8,60	6,30	-3,00
CTDF01A	59	7,60	-21,70	6,80	-9,60
CTMF01A	3403	7,80	-42,30	7,50	-13,70
CTDK01C	1899	7,60	-10,50	6,90	-3,50
CTDF01C	9108	12,20	-28,70	11,70	-4,70
CTRF01C	1299	16,00	-16,90	14,10	-8,50
CTBF01B	1413	13,90	1,00	14,50	-5,70
CTXV01B	1316	9,90	9,10	9,80	2,00
CTEP01A	1402	9,40	-3,50	9,20	-0,80
CTBA01A	3451	11,40	-25,90	11,20	-5,20
CTVI01A	3101	14,00	4,40	13,00	-9,80
CTRF01A	1920	15,70	-23,20	12,90	-9,40
valor médio absoluto [dB]		10,07	12,86	9,68	5,46

TABELA 3-10 – Valores de desvio padrão e do desvio médio com e sem fatores de correção para o modelo II -parâmetros calibrados.

Site	Quantidade de medidas	Modelo II - Korowajczuk			
		Sem fatores de correção		Com fatores de correção	
		Desvio padrão [dB]	Desvio médio [dB]	Desvio padrão [dB]	Desvio médio [dB]
CTBA01B	1913	4,90	2,00	4,90	0,00
CTBT01A	5791	8,40	38,90	6,40	8,90
CTRB01A	19788	10,10	13,50	7,90	4,60
CTVO01B	4918	8,20	-4,20	7,80	2,30
CTBF01A	2278	16,50	10,80	13,20	1,10
CTPV01A	10842	7,20	15,80	7,10	-0,90
CTJN01C	3714	9,50	-8,90	9,80	4,90
CTAM01B	3942	9,00	4,60	7,30	-2,00
CTDK01A	2729	12,20	-6,00	11,30	-19,20
CTTE01C	3292	10,20	5,00	8,30	1,40
CTEB01C	1723	5,10	-0,20	4,60	0,20
CTJN01B	1633	7,20	-1,70	7,00	-0,30
CTEU01C	1101	7,60	5,30	8,10	-2,60
CTDF01A	59	3,20	7,30	3,40	3,20
CTMF01A	3403	11,50	5,00	8,70	-5,60
CTDK01C	1899	8,00	-2,60	7,80	-1,80
CTDF01C	9108	15,30	14,50	12,50	6,50
CTRF01C	1299	11,30	17,70	13,20	1,30
CTBF01B	1413	16,80	5,70	15,00	-0,70
CTXV01B	1316	13,50	16,00	12,70	4,10
CTEP01A	1402	12,30	8,40	10,30	1,30
CTBA01A	3451	8,50	-4,60	5,40	-3,40
CTVI01A	3101	11,90	7,40	9,80	-7,30
CTRF01A	1920	10,20	11,30	11,80	-0,80
valor médio absoluto [dB]		9,94	9,06	8,93	3,52

TABELA 3-11 – Valores de desvio padrão e do desvio médio com e sem fatores de correção para o modelo IV - parâmetros calibrados.

Site	Quantidade de medidas	Modelo IV - Erceg			
		Sem fatores de correção		Com fatores de correção	
		Desvio padrão [dB]	Desvio médio [dB]	Desvio padrão [dB]	Desvio médio [dB]
CTBA01B	1913	7,00	-7,40	6,90	-2,80
CTBT01A	5791	11,80	31,10	9,20	9,50
CTRB01A	19788	14,30	0,80	8,80	5,40
CTVO01B	4918	13,00	-8,70	5,90	-1,20
CTBF01A	2278	14,00	-4,50	13,40	-2,60
CTPV01A	10842	7,30	6,10	6,90	0,50
CTJN01C	3714	12,80	-19,00	10,80	3,80
CTAM01B	3942	8,80	-16,70	8,10	-4,60
CTDK01A	2729	12,90	-18,50	13,70	-16,30
CTTE01C	3292	13,20	-9,40	10,60	-2,80
CTEB01C	1723	6,50	-10,90	5,80	-5,50
CTJN01B	1633	9,90	-13,10	9,20	-3,50
CTEU01C	1101	7,10	-5,40	6,80	-3,40
CTDF01A	59	6,60	6,30	7,90	-3,50
CTMF01A	3403	16,00	-7,30	12,10	-4,90
CTDK01C	1899	9,30	-20,40	7,40	-6,00
CTDF01C	9108	19,50	2,10	9,60	-0,70
CTRF01C	1299	12,90	2,30	13,30	-2,60
CTBF01B	1413	15,10	-5,60	15,60	-7,60
CTXV01B	1316	14,70	-8,10	12,10	-2,20
CTEP01A	1402	9,60	-2,80	9,40	-0,70
CTBA01A	3451	11,70	-12,90	8,80	-6,20
CTVI01A	3101	13,20	-0,20	11,50	-11,80
CTRF01A	1920	12,30	-3,40	12,30	-4,20
valor médio absoluto [dB]		11,65	9,29	9,84	4,68

O valor médio absoluto presente nas TABELAS 3-9,3-10 e 3-11 refere-se à média do valor absoluto do desvio padrão e do desvio médio com e sem fatores de correção.

De posse dos dados estatísticos e da informação contida no décimo sexto e vigésimo quarto bloco pode-se então fazer a comparação estatística baseada na informação contida pelo vigésimo oitavo bloco. Deste modo verifica-se se houve uma minimização do erro. Finalmente o vigésimo nono bloco avalia esta diminuição de erro e finaliza ou retorna ao segundo bloco para avaliar as bases de dados refazendo o processo. O vigésimo oitavo e vigésimo nono blocos serão avaliados no próximo capítulo, onde a metodologia será validada.

3.9 CONCLUSÃO

Neste capítulo foi apresentada uma metodologia para escolha dos parâmetros de propagação dos modelos.

É importante considerar a confiabilidade da base de dados utilizada, pois todos os cálculos realizados baseiam-se nas mesmas.

Deve-se considerar uma área de estudo e verificar os modelos de propagação utilizáveis nela e em sua faixa de frequência. Neste caso adotou-se a área central de Curitiba.

A filtragem que é a seleção dos dados a considerar deve ser cuidadosamente avaliada, neste caso optou-se por avaliar apenas os dados dentro do lóbulo principal da antena irradiante, desconsiderando-se os outros pontos, visto que nestes pontos pode-se ter a influência de outras estações e/ou dos lóbulos secundários delas.

A avaliação entre as medições e predições do sinal foram realizada ponto a ponto, fornecendo valores com a média do desvio e o desvio padrão das diferenças.

Outra característica importante dos cálculos foi o fracionamento da morfologia, onde os cálculos foram feitos com um único fator de correção, ou dividindo-a, de modo a se ter vários fatores de correção.

Foi realizada uma calibração conjunta para 20 estações para cada modelo, o limite máximo aceito pelo programa é de 91.000 pontos. Foram então utilizados 90.991 pontos onde se encontrou os valores dos parâmetros de propagação para cada um dos modelos na morfologia.

A validação da metodologia apresentada ocorrerá no próximo capítulo, onde comparações estatísticas entre o desvio padrão e o desvio médio em valores absolutos com e sem fatores de correção serão utilizados.

3.10 REFERÊNCIAS

[3-1] – GOUVEIA, Fabrício C. “ Proposta de uma metodologia de dimensionamento de um sistema GSM, com análise de caso para uma região urbana em Curitiba.”, dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, 2003.

[3-2] – STAHLKE, Ronald F. “Análise e estudo da influência dos efeitos atmosféricos na propagação de ondas eletromagnéticas na faixa SHF: estudo de caso e aplicação a um enlace operando em 23,6 GHz.”, dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, 2006.

[3-3] – FELICE, Fernando. “Análise do desempenho de enlaces ponto-a-ponto utilizando a faixa de frequência não licenciada de 2,4 GHz em tecnologia spread spectrum.”, dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, 2005.

[3-4] – SARAIVA, Ernandes A. “Determinação da influência do radome na relação de ganho entre lóbulos da antena de radar meteorológico.”, dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, 2006.

CAPÍTULO 4

ANÁLISE DE

RESULTADOS

Este capítulo consolida os resultados obtidos no capítulo anterior através da análise estatística do desvio padrão, do desvio médio e do desvio médio absoluto, visando a verificação do comportamento do erro entre os valores medidos e os valores estimados, com o objetivo de analisar os modelos de propagação.

4.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo visa validar a metodologia desenvolvida. Ao longo deste, a validação da proposta para obtenção dos parâmetros de propagação se dará através da comparação estatística dos modelos. Para tal este capítulo apresentará os resultados em três etapas distintas:

1. Inicialmente será feita a avaliação dos três modelos utilizando os parâmetros gerais e os parâmetros calibrados, bem como os fatores de correção da morfologia. Esta etapa envolve o vigésimo oitavo e vigésimo nono blocos do fluxograma da FIGURA 3-1. O objetivo desta análise é a avaliação da aplicabilidade dos modelos na área estudada.
2. A segunda etapa consiste em considerar o desvio padrão e desvio médio na avaliação do comportamento do sinal sobre a morfologia quando são utilizados os fatores de correção nos três modelos. Esta etapa envolve o vigésimo oitavo e vigésimo nono blocos do fluxograma da FIGURA 3-1. O

objetivo agora é o de mostrar que quando são utilizados os fatores de correção obtém-se uma diminuição no erro envolvido no projeto.

3. Finalmente analisam-se os parâmetros calibrados em relação aos parâmetros gerais, verificando a diminuição no desvio médio e padrão para os três modelos com e sem os fatores de correção. Esta etapa envolve o Vigésimo oitavo e vigésimo nono blocos do fluxograma da FIGURA 3-1. O objetivo neste ponto é realizar uma avaliação dos parâmetros de propagação encontrados verificando se estes possibilitaram uma diminuição no erro entre os valores medidos e os estimados no projeto.

4.2 AVALIAÇÃO DOS TRÊS MODELOS

Como precedentemente dito neste item será feita a avaliação dos três modelos utilizando os parâmetros gerais e os parâmetros calibrados, bem como os fatores de correção da morfologia. Para tal foram utilizadas as TABELAS 3-5, 3-6, 3-7, 3-9, 3-10 e 3-11. O objetivo é o levantamento de gráficos do *desvio padrão [dB] versus site*, do *desvio médio [dB] versus site* e finalmente do *desvio médio absoluto [dB] versus site*. Da análise dos gráficos apresentados será extraída a análise do erro.

O bom entendimento da FIGURA 4-1 é de fundamental importância para a compreensão da primeira parte de apresentação dos resultados. A mesma apresenta a comparação do desvio padrão para os três modelos nos 24 sites estudados, sem a utilização de fatores de correção e utilizando os parâmetros gerais de propagação dos modelos. Desprende-se desta figura:

- Modelo I – Lee-Piquenard apresenta:
 - Valor mínimo = 7,2 dB,
 - Valor máximo = 17,5 dB,
 - Valor médio = 11,1 dB,
 - Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 10,3 dB.
- Modelo II – Korowajczuk apresenta:
 - Valor mínimo = 3,2 dB,
 - Valor máximo = 16,8 dB,
 - Valor médio = 10,0 dB,
 - Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 13,6 dB.

- Modelo IV - Erceg apresenta:
 - Valor mínimo = 6,8 dB,
 - Valor máximo = 19,1 dB,
 - Valor médio = 11,9 dB,
 - Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 12,3 dB.

Observar que o valor médio do desvio padrão está entre 10 e 12 dB para os três modelos, e que a faixa de valores do desvio padrão encontra-se entre 10,3 e 13,6 dB. Neste caso como os valores médios estão bastante próximos, além dos três modelos poderem ser aplicáveis à área em estudo os mesmos também possuem erros bastante próximos.

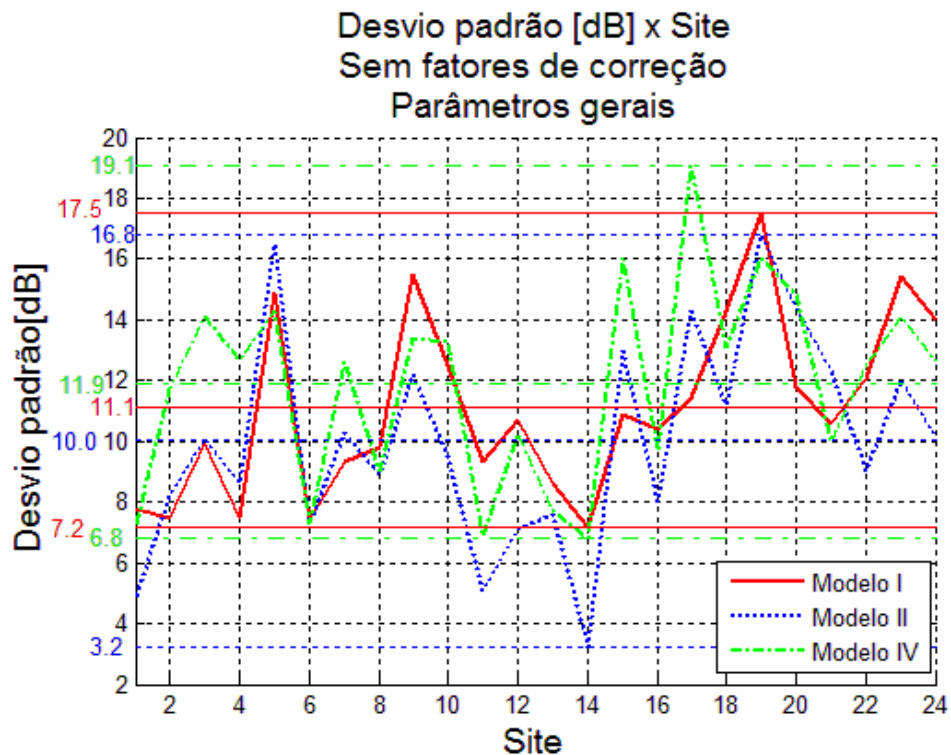


FIGURA 4-1 – Comparação do desvio padrão entre os modelos utilizando os parâmetros gerais sem parâmetros de correção.

A FIGURA 4-2 apresenta a comparação do desvio médio para os três modelos nos 24 sites estudados, sem a utilização de fatores de correção e utilizando os parâmetros gerais de propagação dos modelos, onde se observa que para:

- Modelo I – Lee-Piquenard apresenta:
 - Valor mínimo = -40 dB,

- Valor máximo = -3,5 dB,
- Valor médio = -20,5 dB,
- Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 36,5 dB.
- Modelo II – Korowajczuk apresenta:
 - Valor mínimo = -28,6 dB,
 - Valor máximo = 19,7 dB,
 - Valor médio = -11,6 dB,
 - Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 48,3 dB.
- Modelo IV- Erceg apresenta:
 - Valor mínimo = - 25,2 dB ,
 - Valor máximo = 29 dB,
 - Valor médio = -9,7 dB,
 - Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 54,2 dB.

O valor médio do desvio médio está entre -20,5 e -9,7 dB para os três modelos, e a faixa de valores do desvio médio encontra-se entre 36,5 e 54,2 dB. Neste caso o modelo IV de Erceg apresentou um menor desvio, portanto um menor erro.

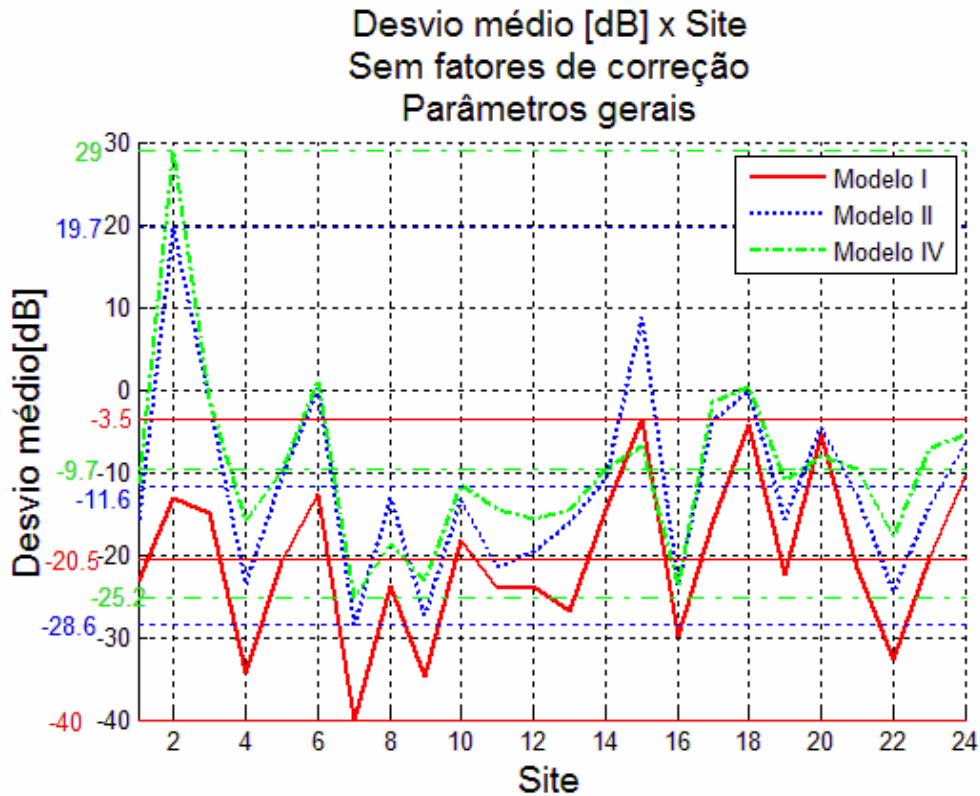


FIGURA 4-2 – Comparação do desvio médio entre os modelos utilizando os parâmetros gerais sem parâmetros de correção.

Antes da apresentação dos resultados utilizando os fatores de correção, convém dizer que o modelo IV apresenta uma melhor *performance*, pois o valor médio do desvio médio absoluto foi menor (menor erro) e o valor médio de desvio padrão foi aproximadamente igual ao dos demais modelos.

A análise realizada a seguir é idêntica à análise realizada anteriormente com a diferença que a partir de agora serão utilizados os fatores de correção. A FIGURA 4-3 então, apresenta a comparação do desvio padrão para os três modelos nos 24 sites estudados, utilizando os fatores de correção e os parâmetros gerais de propagação dos modelos, onde se observa que:

- Modelo I – Lee-Piquenard apresenta:
 - Valor mínimo = 6,6 dB,
 - Valor máximo = 15,1 dB,
 - Valor médio = 10 dB,
 - Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 8,5 dB.
- Modelo II – Korowajczuk apresenta:

- Valor mínimo = 2,9 dB,
 - Valor máximo = 14,8 dB,
 - Valor médio = 9,3 dB,
 - Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 11,9 dB.
- Modelo IV- Erceg apresenta:
 - Valor mínimo = 5,9 dB,
 - Valor máximo = 17,9 dB,
 - Valor médio = 10,1 dB,
 - Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 12 dB.

O valor médio do desvio padrão está entre 9,3 e 10,1 dB para os três modelos, e a faixa de valores do desvio padrão encontra-se entre 8,5 e 12 dB. Neste caso observa-se que os valores médios estão bastante próximos, então os três modelos podem ser aplicáveis à área em estudo.

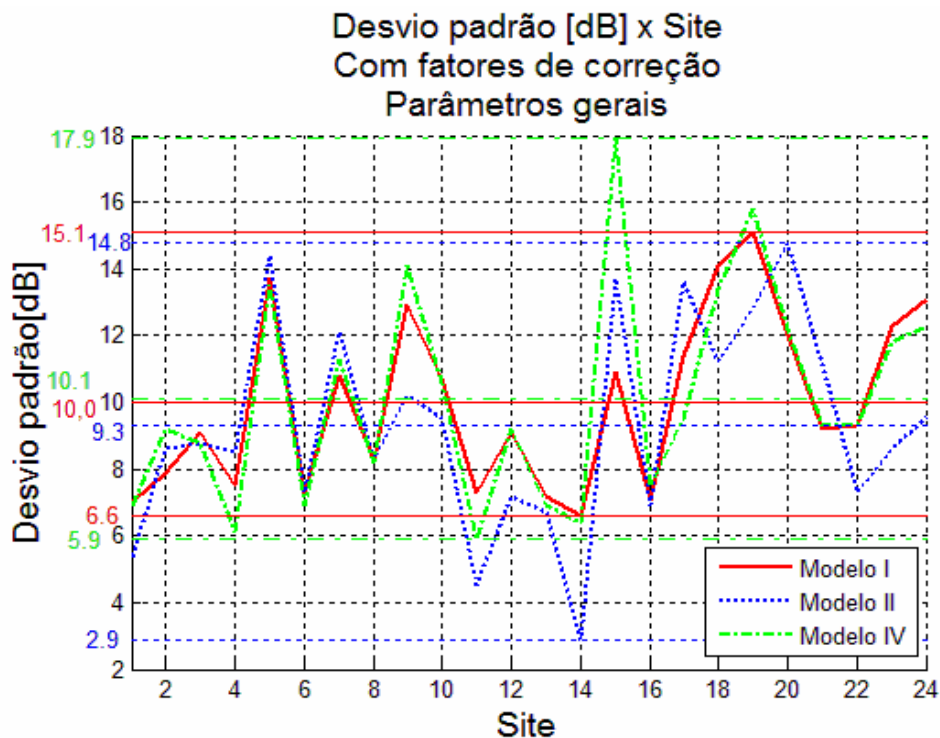


FIGURA 4-3 – Comparação do desvio padrão entre os modelos utilizando os parâmetros gerais com parâmetros de correção.

A FIGURA 4-4 apresenta a comparação do desvio médio para os três modelos nos 24 sites estudados, utilizando fatores de correção, bem como os parâmetros gerais de propagação dos modelos, onde se observa que:

- Modelo I – Lee-Piquenard apresenta:
 - Valor mínimo = -26,2 dB,
 - Valor máximo = 6,2 dB,
 - Valor médio = - 6 dB,
 - Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 32,4 dB.
- Modelo II – Korowajczuk apresenta:
 - Valor mínimo = -20,2 dB,
 - Valor máximo = 7,7 dB,
 - Valor médio = -2,4 dB,
 - Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 27,9 dB.
- Modelo IV- Erceg apresenta:
 - Valor mínimo = - 17,4 dB ,
 - Valor máximo = 12,6 dB,
 - Valor médio = - 3,5 dB,
 - Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 30 dB.

O valor médio do desvio médio está entre -6 e -2,4 dB para os três modelos, e a faixa de valores do desvio médio encontra-se entre 27,9 e 32,4 dB. Neste caso o modelo II de Korowajczuk apresentou um menor desvio, portanto um menor erro.

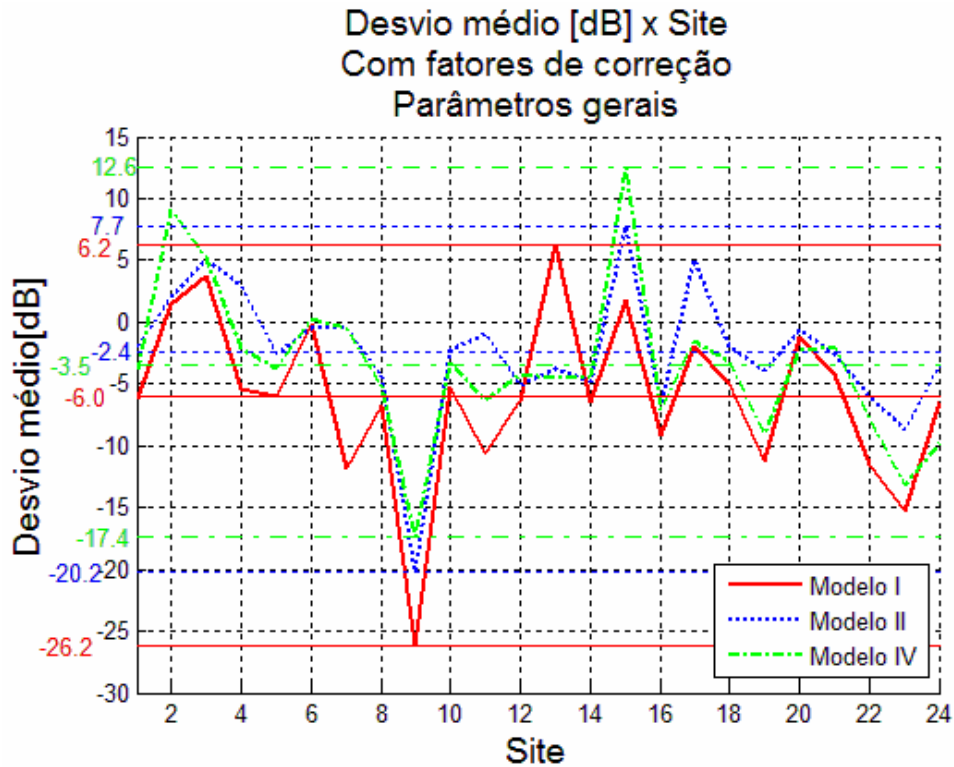


FIGURA 4-4 – Comparação do desvio médio entre os modelos utilizando os parâmetros gerais com parâmetros de correção.

Antes da apresentação dos resultados utilizando parâmetros calibrados, convém dizer que o modelo II apresenta uma melhor *performance*, pois o valor médio do desvio médio absoluto foi menor (menor erro) e o valor médio de desvio padrão foi aproximadamente igual ao dos demais modelos.

A análise realizada a seguir é idêntica à análise realizada anteriormente com a diferença que a partir de agora serão utilizados os parâmetros calibrados. A FIGURA 4-5 então, apresenta a comparação do desvio padrão para os três modelos nos 24 sites estudados, sem a utilização de fatores de correção e utilizando os parâmetros calibrados dos modelos, onde se observa que:

- Modelo I – Lee-Piquenard apresenta:
 - Valor mínimo = 6,3 dB,
 - Valor máximo = 16 dB,
 - Valor médio = 10,1 dB,
 - Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 9,7 dB.

- Modelo II – Korowajczuk apresenta:
 - Valor mínimo = 3,2 dB,
 - Valor máximo = 16,8 dB,
 - Valor médio = 9,9 dB,
 - Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 13,6 dB.
- Modelo IV- Erceg apresenta:
 - Valor mínimo = 6,5 dB,
 - Valor máximo = 19,5 dB,
 - Valor médio = 11,6 dB,
 - Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 13 dB.

O valor médio do desvio padrão está entre 9,9 e 11,6 dB para os três modelos, e a faixa de valores do desvio padrão encontra-se entre 9,7 e 13,6 dB. Neste caso observa-se que os valores médios estão bastante próximos, então os três modelos podem ser aplicáveis à área em estudo.

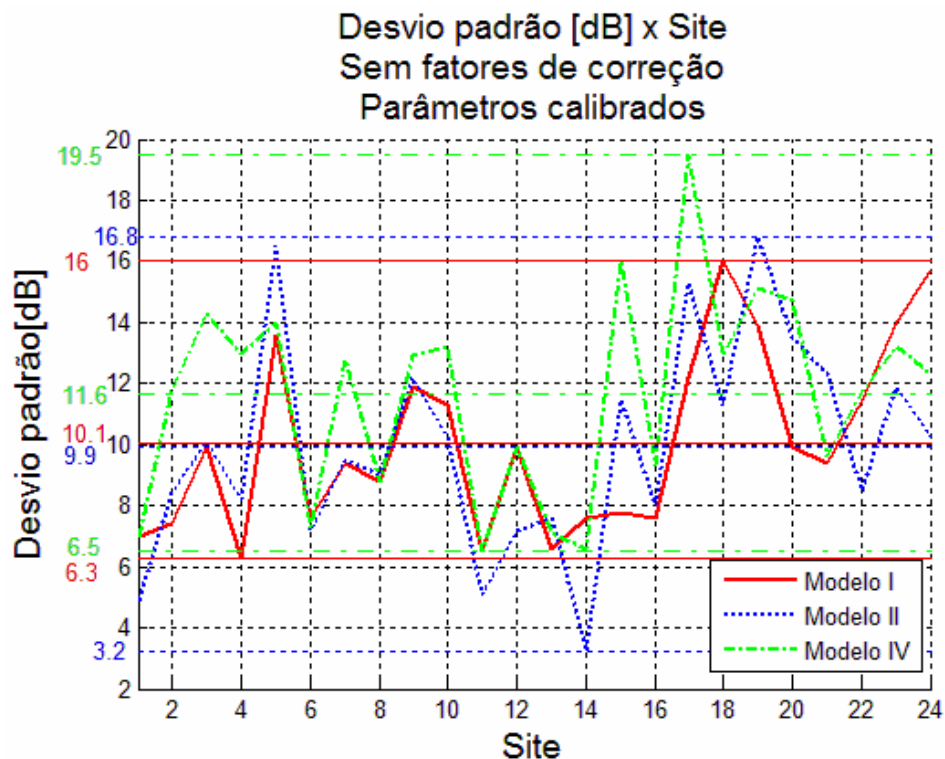


FIGURA 4-5 – Comparação do desvio padrão entre os modelos utilizando os parâmetros calibrados sem parâmetros de correção

A FIGURA 4-6 apresenta a comparação do desvio médio para os três modelos nos 24 sites estudados, sem a utilização de fatores de correção e utilizando os parâmetros calibrados dos modelos, onde se observa que:

- Modelo I – Lee-Piquenard apresenta:
 - Valor mínimo = -42,3 dB,
 - Valor máximo = 18,5 dB,
 - Valor médio = -9,3 dB,
 - Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 60,8 dB.
- Modelo II – Korowajczuk apresenta:
 - Valor mínimo = -8,9 dB,
 - Valor máximo = 38,9 dB,
 - Valor médio = 6,7 dB,
 - Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 47,8 dB.
- Modelo IV- Erceg apresenta:
 - Valor mínimo = -20,4 dB ,
 - Valor máximo = 31,1 dB,
 - O valor médio = -5,2 dB,
 - Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 51,5 dB.

O valor médio do desvio médio está entre -9,3 e 6,7 dB para os três modelos, e a faixa de valores do desvio médio encontra-se entre 47,8 e 60,8 dB. Neste caso o modelo IV de Erceg apresentou um menor desvio, portanto um menor erro.

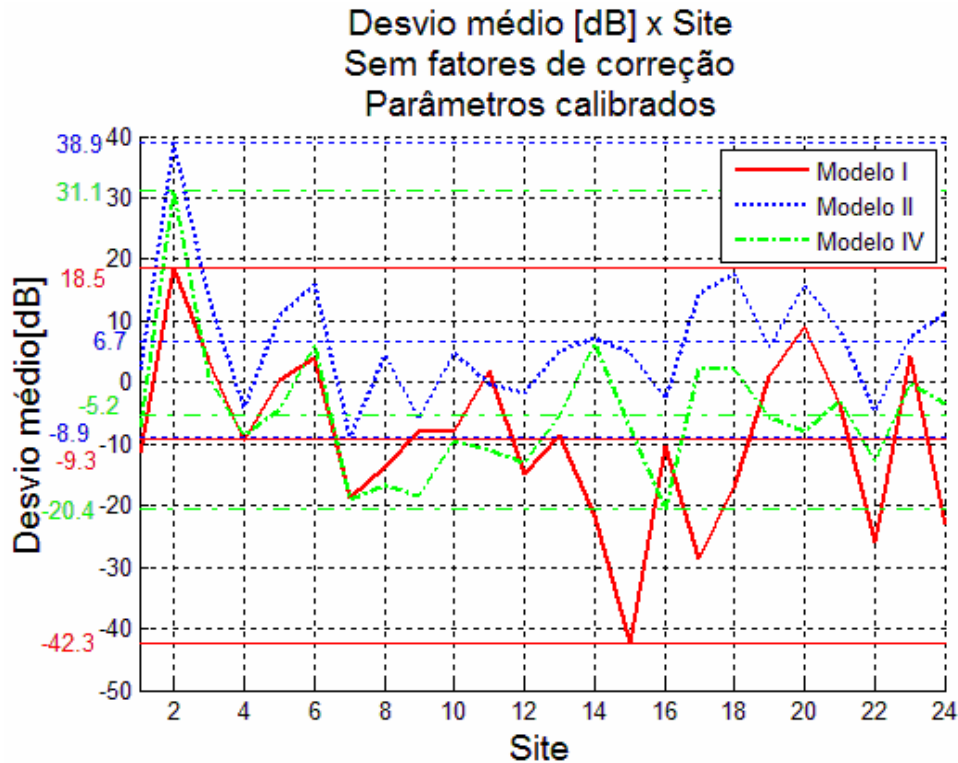


FIGURA 4-6 – Comparação do desvio médio entre os modelos utilizando os parâmetros calibrados sem parâmetros de correção

Antes da apresentação dos resultados utilizando os fatores de correção, convém dizer que o modelo IV apresenta uma melhor *performance*, pois o valor médio do desvio médio absoluto foi menor (menor erro) e o valor médio de desvio padrão foi aproximadamente igual ao dos demais modelos.

A análise realizada a seguir é idêntica à análise realizada anteriormente com a diferença que a partir de agora serão utilizados os parâmetros calibrados. A FIGURA 4-7 então, apresenta a comparação do desvio padrão para os três modelos nos 24 sites estudados, utilizando os fatores de correção e os parâmetros calibrados dos modelos, onde se observa que:

- Modelo I – Lee-Piquenard apresenta:
 - Valor mínimo = 6,3 dB,
 - Valor máximo = 14,5 dB,
 - Valor médio = 9,7 dB,
 - Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 8,2 dB.

- Modelo II – Korowajczuk apresenta:
 - Valor mínimo = 3,4 dB,
 - Valor máximo = 15 dB,
 - Valor médio = 8,9 dB,
 - Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 11,6 dB.
- Modelo IV- Erceg apresenta:
 - Valor mínimo = 5,8 dB,
 - Valor máximo = 15,6 dB,
 - Valor médio = 9,8 dB,
 - Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 9,8 dB.

O valor médio do desvio padrão está entre 8,9 e 9,8 dB para os três modelos, e a faixa de valores do desvio padrão encontra-se entre 8,2 e 11,6 dB. Neste caso observa-se que os valores médios estão bastante próximos, então os três modelos podem ser aplicáveis à área em estudo.

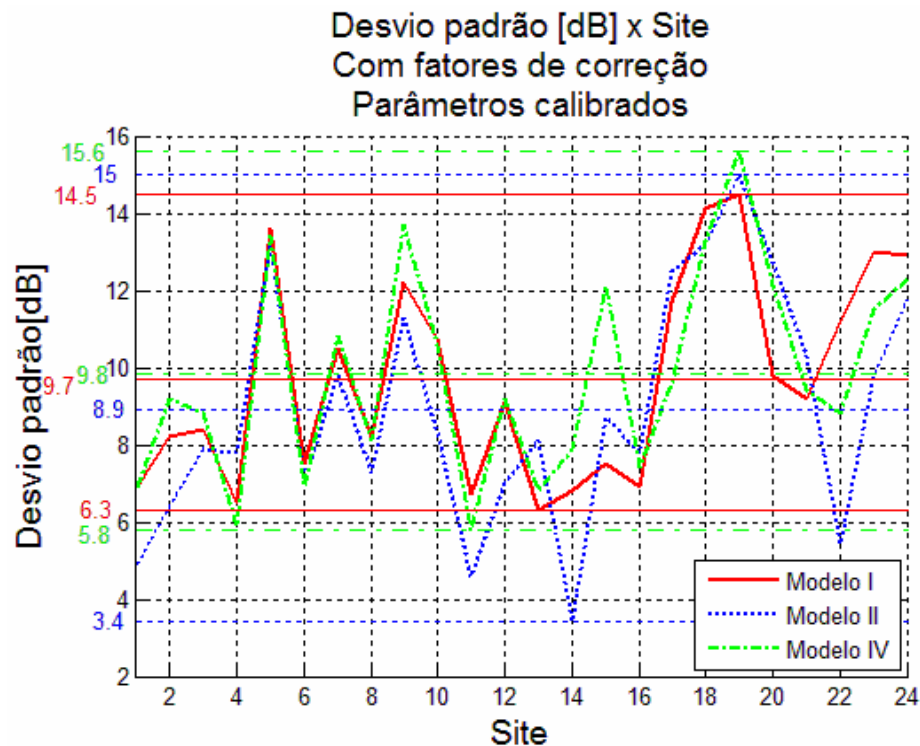


FIGURA 4-7 – Comparação do desvio padrão entre os modelos utilizando os parâmetros calibrados com parâmetros de correção.

A FIGURA 4-8 apresenta a comparação do desvio médio para os três modelos nos 24 sites estudados, utilizando de fatores de correção, bem como os parâmetros calibrados dos modelos, onde se observa que:

- Modelo I – Lee-Piquenard apresenta:
 - Valor mínimo = -18,3 dB,
 - Valor máximo = 5,6 dB,
 - Valor médio = -3,9 dB,
 - Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 23,9 dB.
- Modelo II – Korowajczuk apresenta:
 - Valor mínimo = -19,2 dB,
 - Valor máximo = 8,9 dB,
 - Valor médio = -0,2 dB,
 - Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 28,1 dB.
- Modelo IV- Erceg apresenta:
 - Valor mínimo = -16,3 dB ,
 - Valor máximo = 9,5 dB,
 - Valor médio = -3,1 dB,
 - Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 25,8 dB.

O valor médio do desvio médio está entre - 3,9 e -0,2 dB para os três modelos, e a faixa de valores do desvio médio encontra-se entre 23,9 e 25,8 dB. Neste caso o modelo II de Korowajczuk apresentou um menor desvio, portanto um menor erro.

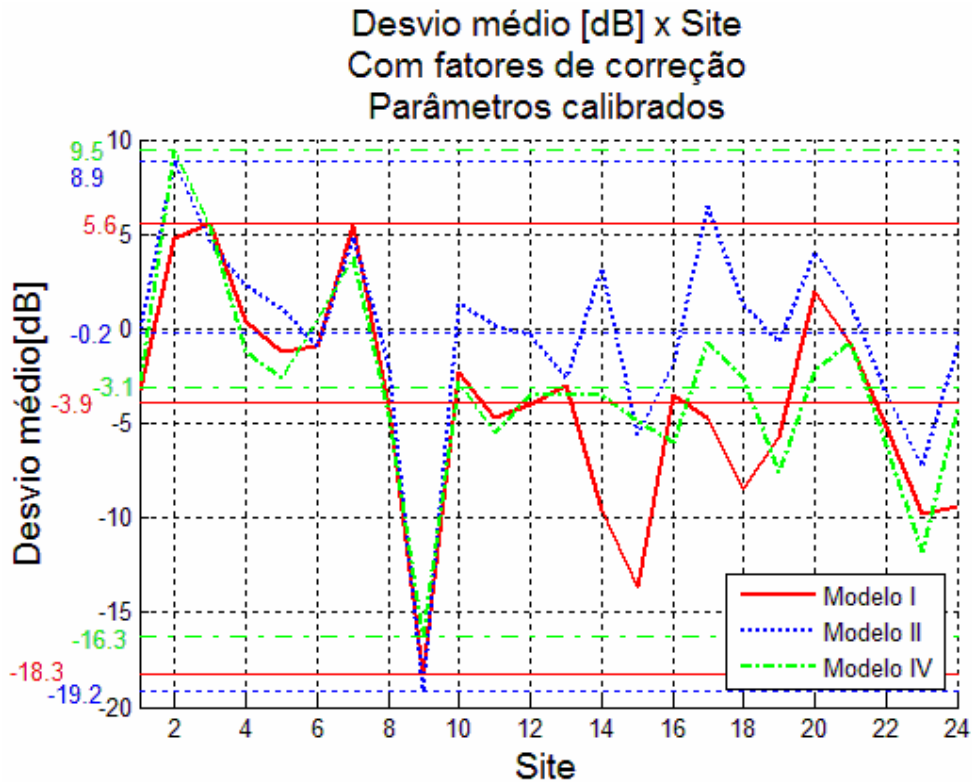


FIGURA 4-8 – Comparação do desvio médio entre os modelos utilizando os parâmetros calibrados com parâmetros de correção.

Pode-se dizer que para os parâmetros calibrados dos modelos utilizando parâmetros de correção o modelo II apresentou uma melhor *performance*, pois o valor médio do desvio médio absoluto foi menor e o valor médio de desvio padrão aproximadamente igual aos demais modelos.

Uma conclusão interessante a ser extraída deste tópico (avaliação dos três modelos) é que o valor médio tanto do desvio médio absoluto quanto do desvio padrão para os modelos em todos os casos não ultrapassou o valor de 6,1 dB e 2,4 dB respectivamente. Portanto pode-se dizer que os três modelos tiveram um bom desempenho para a área em estudo.

Outro ponto interessante a considerar é que se forem utilizados os fatores de correção tem-se uma diminuição nos valores de desvio médio e desvio padrão. A análise a seguir apresenta a diferença entre o desvio padrão e desvio médio considerando ou não os fatores de correção para os três modelos.

4.3 AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DOS FATORES DE CORREÇÃO

Neste item será feita a avaliação da utilização dos fatores de correção sobre a morfologia para os três modelos, utilizando os parâmetros gerais e os parâmetros calibrados. Para tal foram utilizadas as TABELAS 3-5, 3-6, 3-7, 3-9, 3-10 e 3-11. O objetivo é o levantamento de gráficos do *desvio padrão* [dB] versus *site*, do *desvio médio* [dB] versus *site* e finalmente do *desvio médio absoluto* [dB] versus *site*. Da análise dos gráficos apresentados será extraída a análise do erro.

O bom entendimento da FIGURA 4-9 é de fundamental importância para a compreensão da primeira parte da apresentação dos resultados. A mesma apresenta a comparação do desvio padrão para o modelo I nos 24 sites estudados utilizando ou não os fatores de correção e os parâmetros gerais de propagação dos modelos. Desprende-se desta figura:

- Sem parâmetros de correção apresenta:
 - Valor mínimo = 7,2 dB,
 - Valor máximo = 17,5 dB,
 - Valor médio = 11,1 dB,
 - Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 10,3 dB.
- Com parâmetros de correção apresenta:
 - Valor mínimo = 6,6 dB,
 - Valor máximo = 15,1 dB,
 - Valor médio = 10 dB,
 - Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 8,5 dB.

O valor médio do desvio padrão diminuiu de 1,1 dB e sua faixa diminuiu de 1,8 dB, com a utilização dos fatores de correção sobre a morfologia. Portanto a utilização de fatores de correção sobre a morfologia diminuiu o erro.

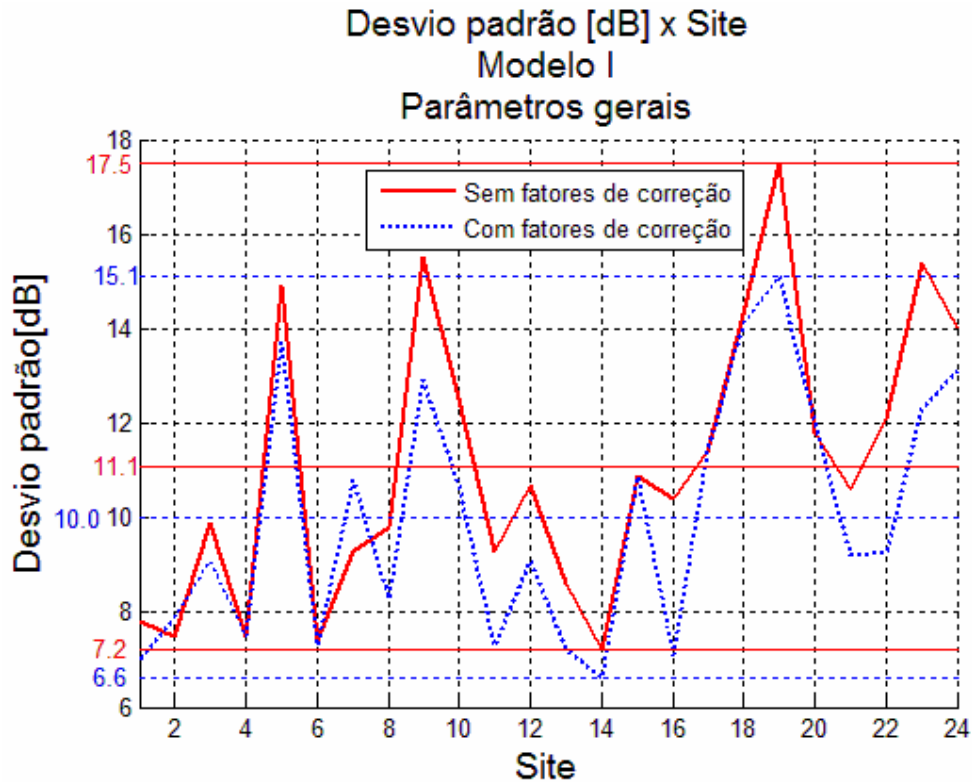


FIGURA 4-9 – Comparação, utilizando ou não fatores de correção, do desvio padrão para o modelo I utilizando os parâmetros gerais do modelo.

A FIGURA 4-10 apresenta a comparação, utilizando ou não os fatores de correção no Modelo I, do desvio médio nos 24 sites estudados, utilizando os parâmetros gerais de propagação do modelo, onde se observa que:

- Sem parâmetros de correção apresenta:
 - Valor mínimo = -40 dB,
 - Valor máximo = -3,5 dB,
 - Valor médio = -20,51 dB,
 - Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 36,5 dB.
- Com parâmetros de correção apresenta:
 - Valor mínimo = -26,2 dB,
 - Valor máximo = 6,2 dB,
 - Valor médio = -6 dB,
 - Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 32,4 dB.

O valor médio do desvio médio diminuiu de 14,5 dB e sua faixa diminuiu de 3,9 dB, com a utilização dos fatores de correção sobre a morfologia. Portanto a utilização de fatores de correção sobre a morfologia diminuiu o erro.

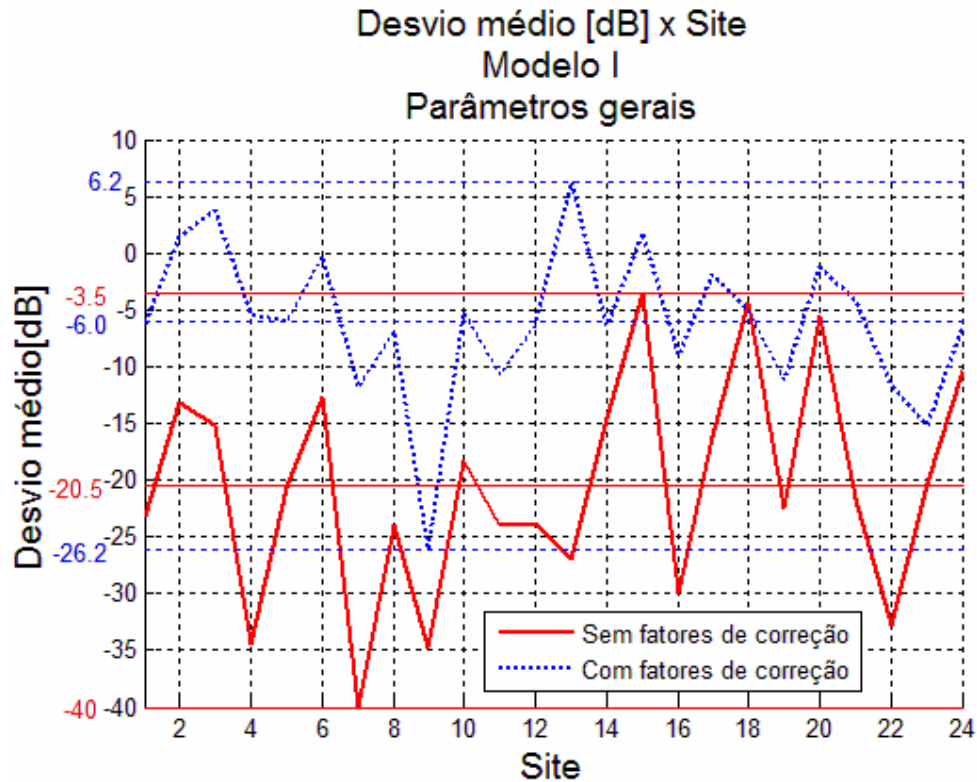


FIGURA 4-10 – Comparação, utilizando ou não fatores de correção, do desvio médio para o modelo I utilizando os parâmetros gerais do modelo.

A FIGURA 4-11 apresenta a comparação, utilizando ou não os fatores de correção no Modelo II, do desvio padrão nos 24 sites estudados, utilizando os parâmetros gerais de propagação do modelo, onde se observa que:

- Sem parâmetros de correção apresenta:
 - Valor mínimo = 3,2 dB,
 - Valor máximo = 16,8 dB,
 - Valor médio = 10 dB,
 - Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 13,6 dB.
- Com parâmetros de correção apresenta:
 - Valor mínimo = 2,9 dB,

- Valor máximo = 14,8 dB,
- Valor médio = 9,3 dB,
- Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 11,9 dB.

O valor médio do desvio padrão diminuiu de 0,7 dB e sua faixa diminuiu de 1,7dB, com a utilização dos fatores de correção sobre a morfologia. Portanto a utilização de fatores de correção sobre a morfologia diminuiu o erro.

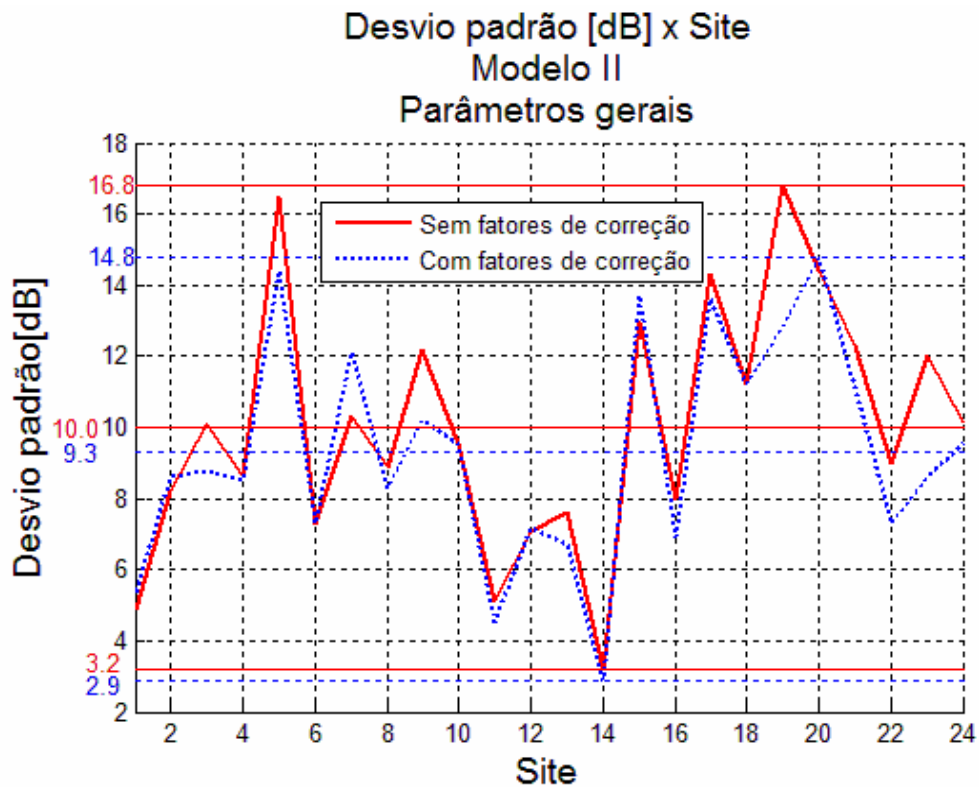


FIGURA 4-11 – Comparação, utilizando ou não fatores de correção, do desvio padrão para o modelo II utilizando os parâmetros gerais do modelo.

A FIGURA 4-12 apresenta a comparação, utilizando ou não os fatores de correção no Modelo II, do desvio médio nos 24 sites estudados, utilizando os parâmetros gerais de propagação do modelo, onde se observa que:

- Sem parâmetros de correção apresenta:
 - Valor mínimo = -28,6 dB,
 - Valor máximo = 19,7 dB,

- Valor médio = -11,6 dB,
- Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 48,3 dB.
- Com parâmetros de correção apresenta:
 - Valor mínimo = -20,2 dB,
 - Valor máximo = 7,7 dB,
 - Valor médio = -2,4 dB,
 - Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 27,9 dB.

O valor médio do desvio médio diminuiu de 9,2 dB e sua faixa diminuiu de 20,4 dB, com a utilização dos fatores de correção sobre a morfologia. Portanto a utilização de fatores de correção sobre a morfologia diminuiu o erro.

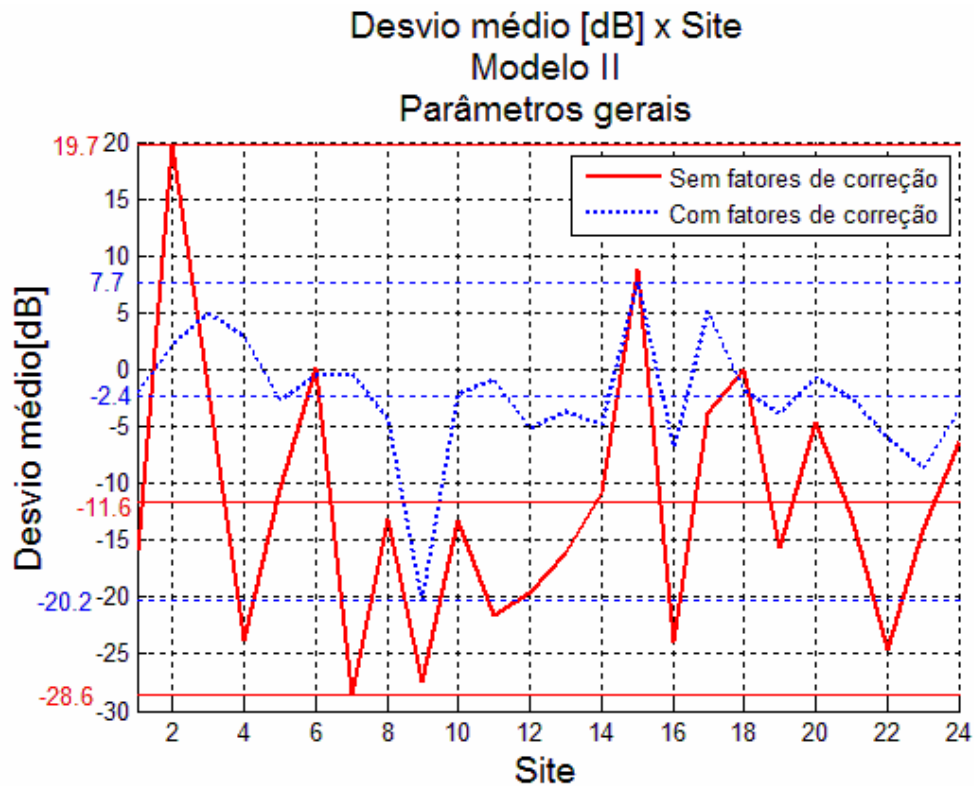


FIGURA 4-12 – Comparação, utilizando ou não fatores de correção, do desvio médio para o modelo II utilizando os parâmetros gerais do modelo.

A FIGURA 4-13 apresenta a comparação, utilizando ou não os fatores de correção no Modelo IV, do desvio padrão nos 24 sites estudados, utilizando os parâmetros gerais de propagação do modelo, onde se observa que:

- Sem parâmetros de correção apresenta:
 - Valor mínimo = 6,8 dB,
 - Valor máximo = 19,1 dB,
 - Valor médio = 11,9 dB,
 - Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 12,3 dB.
- Com parâmetros de correção apresenta:
 - Valor mínimo = 5,9 dB,
 - Valor máximo = 17,9 dB,
 - Valor médio = 10,1 dB,
 - Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 12 dB.

O valor médio do desvio padrão diminuiu de 1,8 dB e sua faixa diminuiu de 0,3 dB, com a utilização dos fatores de correção sobre a morfologia. Portanto a utilização de fatores de correção sobre a morfologia diminuiu o erro.

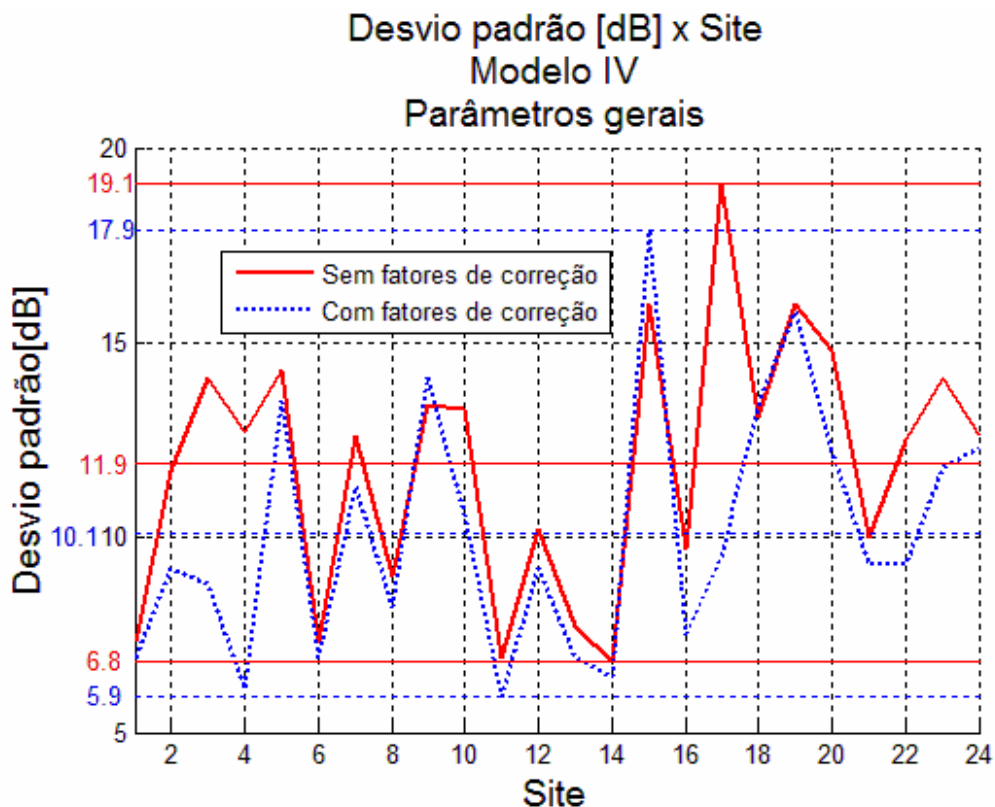


FIGURA 4-13 – Comparação, utilizando ou não fatores de correção, do desvio padrão para o modelo IV utilizando os parâmetros gerais do modelo.

A FIGURA 4-14 apresenta a comparação, utilizando ou não os fatores de correção no Modelo IV, do desvio médio nos 24 sites estudados, utilizando os parâmetros gerais de propagação do modelo, onde se observa que:

- Sem parâmetros de correção apresenta:
 - Valor mínimo = -25,2 dB,
 - Valor máximo = 29 dB,
 - Valor médio = -9,7 dB,
 - Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 54,2 dB.
- Com parâmetros de correção apresenta:
 - Valor mínimo = -17,4 dB,
 - Valor máximo = 12,6 dB,
 - Valor médio = -3,5 dB,
 - Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 30 dB.

O valor médio do desvio médio diminuiu de 6,4 dB e sua faixa diminuiu de 24,2 dB, com a utilização dos fatores de correção sobre a morfologia. Portanto a utilização de fatores de correção sobre a morfologia diminuiu o erro.

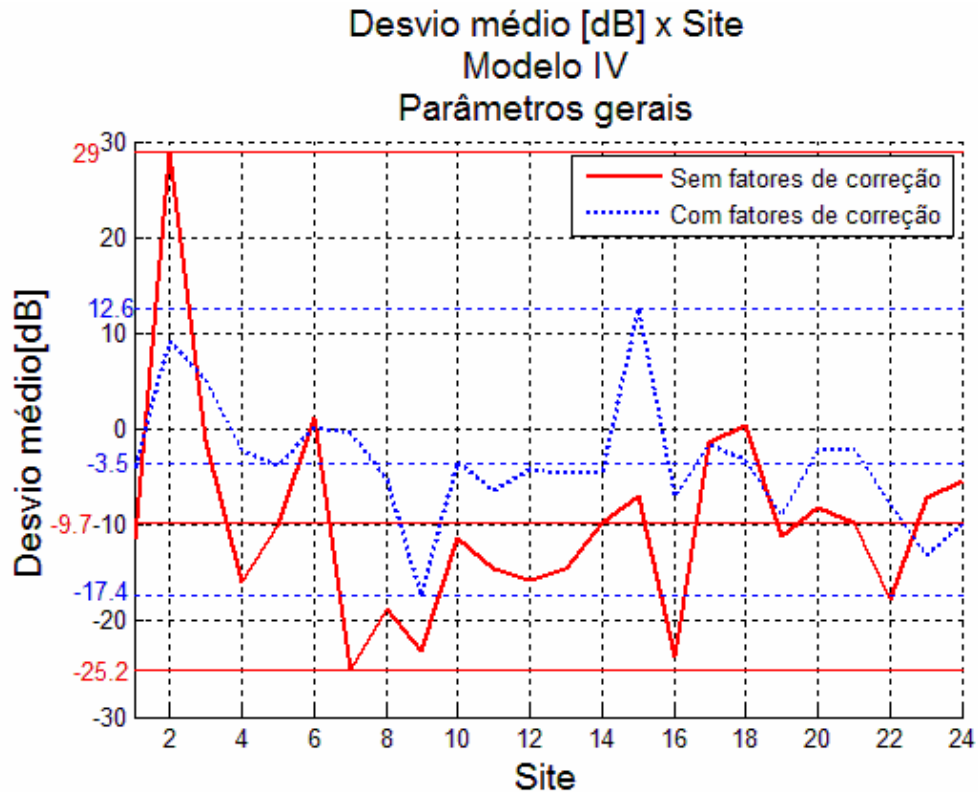


FIGURA 4-14 – Comparação, utilizando ou não fatores de correção, do desvio médio para o modelo IV utilizando os parâmetros gerais do modelo.

Antes da apresentação dos resultados utilizando os parâmetros de propagação calibrados, convém dizer que a utilização dos fatores de correção sobre a morfologia utilizando os parâmetros gerais de propagação dos modelos apresenta uma melhor *performance*, pois tanto o valor médio do desvio médio absoluto quanto o valor médio de desvio padrão foram menores (menor erro).

A análise realizada a seguir é idêntica à análise realizada anteriormente com a diferença que a partir de agora serão utilizados parâmetros de propagação calibrados para os modelos. A FIGURA 4-15 apresenta a comparação, utilizando ou não os fatores de correção no Modelo I, do desvio padrão nos 24 sites estudados, utilizando os parâmetros calibrados do modelo, onde se observa que:

- Sem parâmetros de correção apresenta:
 - Valor mínimo = 6,3 dB,
 - Valor máximo = 16 dB,
 - Valor médio = 10,1 dB,

- Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 9,7 dB.
- Com parâmetros de correção apresenta:
 - Valor mínimo = 6,3 dB,
 - Valor máximo = 14,5 dB,
 - Valor médio = 9,7 dB,
 - Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 8,2 dB.

O valor médio do desvio padrão diminuiu de 0,4 dB e sua faixa diminuiu de 1,5 dB, com a utilização dos fatores de correção sobre a morfologia. Portanto a utilização de fatores de correção sobre a morfologia diminuiu o erro.

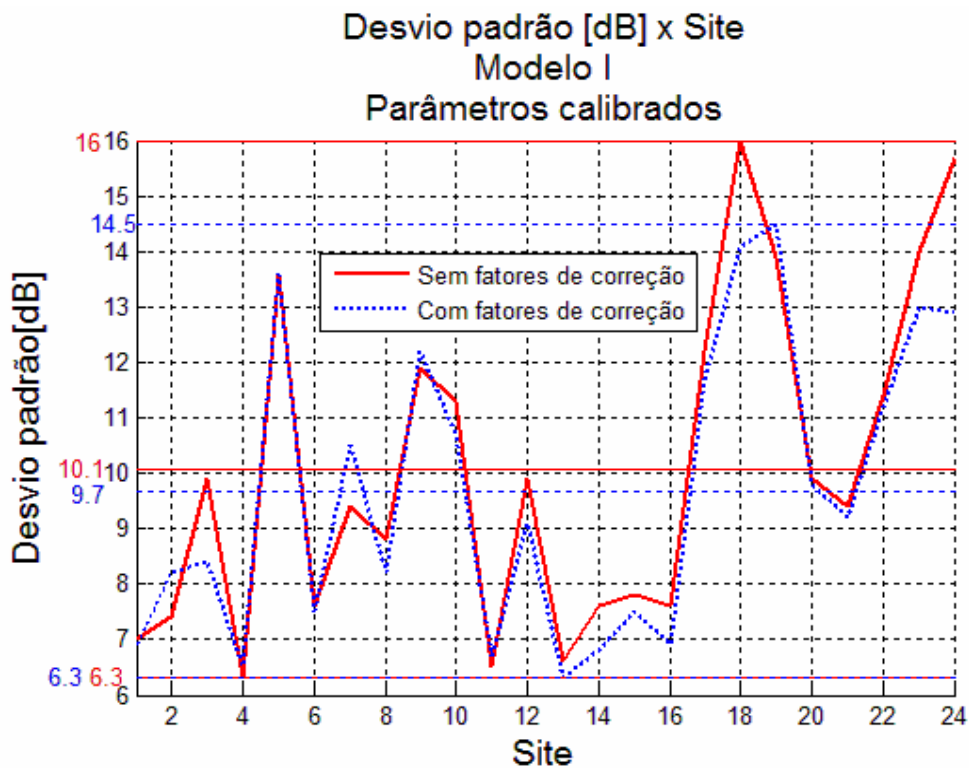


FIGURA 4-15 – Comparação, utilizando ou não fatores de correção, do desvio padrão para o modelo I utilizando os parâmetros calibrados do modelo.

A FIGURA 4-16 apresenta a comparação, utilizando ou não os fatores de correção no Modelo I, dos desvio médio nos 24 sites estudados, utilizando os parâmetros calibrados do modelo, onde se observa que:

- Sem parâmetros de correção apresenta:
 - Valor mínimo = -42,3 dB,
 - Valor máximo = 18,5 dB,

- Valor médio = -9,3 dB,
- Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 60,8 dB.
- Com parâmetros de correção apresenta:
 - Valor mínimo = -18,3 dB,
 - Valor máximo = 5,6 dB,
 - Valor médio = -3,9 dB,
 - Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 23,9 dB.

O valor médio do desvio médio diminuiu de 5,4 dB e sua faixa diminuiu de 36,9 dB, com a utilização dos fatores de correção sobre a morfologia. Portanto a utilização de fatores de correção sobre a morfologia diminuiu o erro.

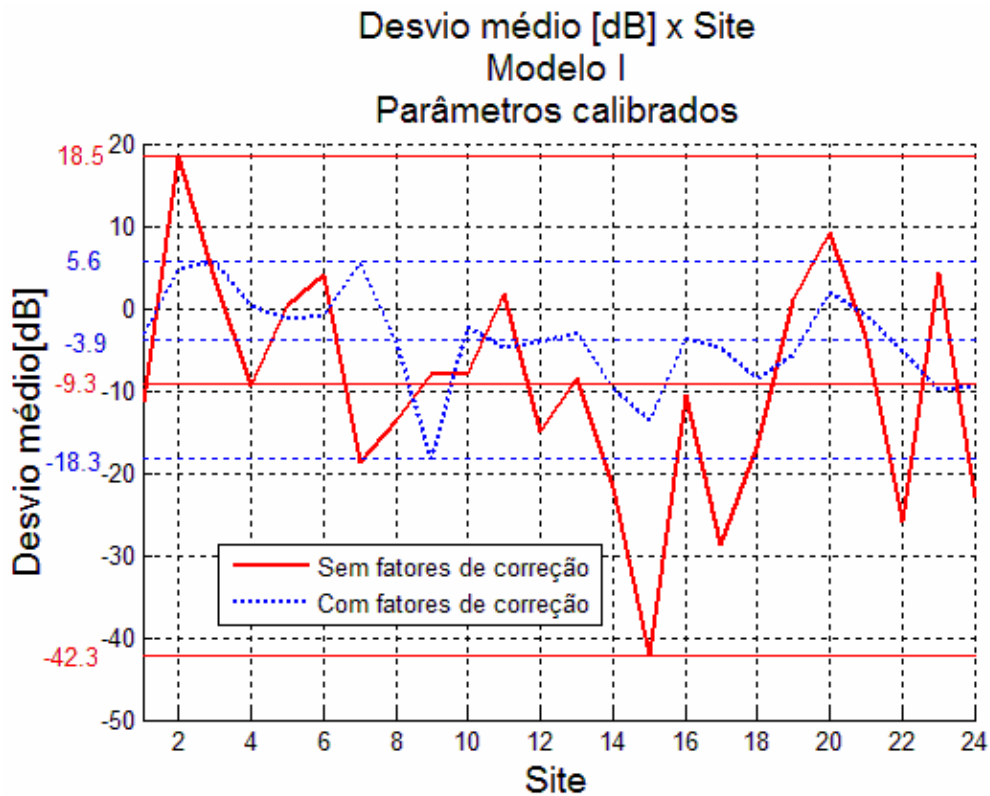


FIGURA 4-16 – Comparação, utilizando ou não fatores de correção, do desvio médio para o modelo I utilizando os parâmetros calibrados do modelo.

A FIGURA 4-17 apresenta a comparação, utilizando ou não os fatores de correção no Modelo II, do desvio padrão nos 24 sites estudados, utilizando os parâmetros propagação calibrados do modelo, onde se observa que:

- Sem parâmetros de correção apresenta:
 - Valor mínimo = 3,2 dB,
 - Valor máximo = 16,8 dB,
 - Valor médio = 9,9 dB,
 - Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 13,6 dB.
- Com parâmetros de correção apresenta:
 - Valor mínimo = 3,4 dB,
 - Valor máximo = 15 dB,
 - Valor médio = 8,9 dB,
 - Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 11,6 dB.

O valor médio do desvio padrão diminuiu de 1 dB e sua faixa diminuiu de 2 dB, com a utilização dos fatores de correção sobre a morfologia. Portanto a utilização de fatores de correção sobre a morfologia diminuiu o erro.

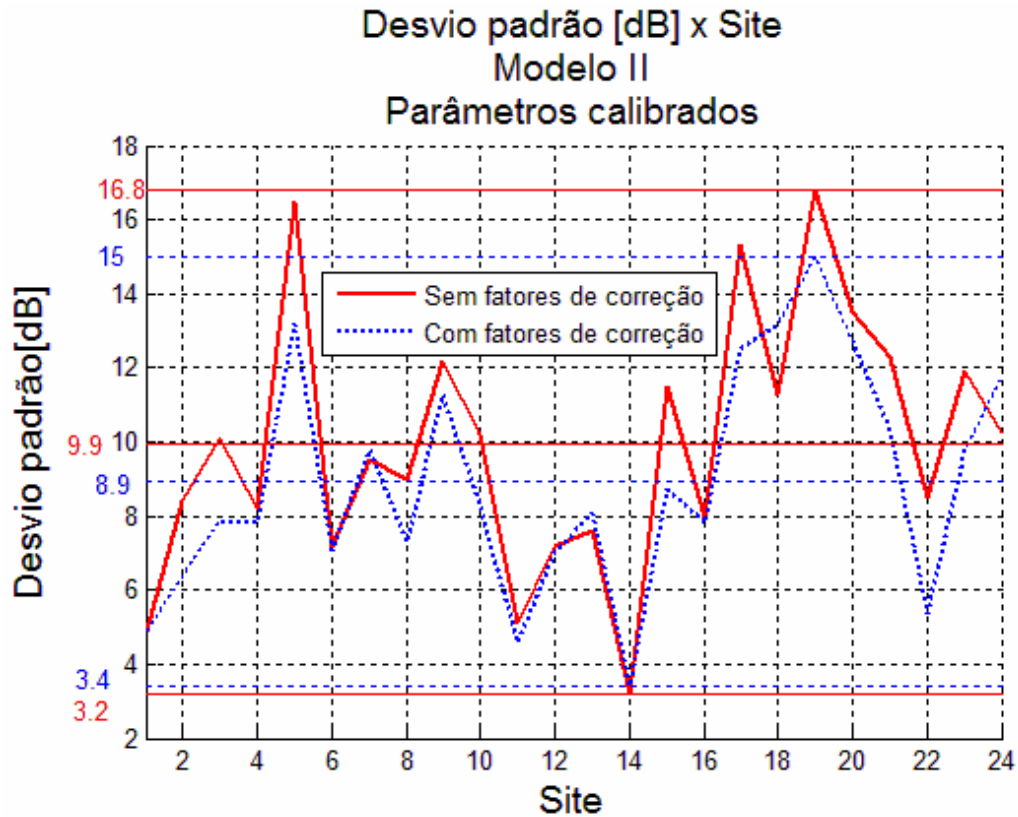


FIGURA 4-17 – Comparação, utilizando ou não fatores de correção, do desvio padrão para o modelo II utilizando os parâmetros calibrados do modelo.

A FIGURA 4-18 apresenta a comparação, utilizando ou não os fatores de correção no Modelo II, do desvio médio nos 24 sites estudados, utilizando os parâmetros propagação calibrados do modelo, onde se observa que:

- Sem parâmetros de correção apresenta:
 - Valor mínimo = -8,9 dB,
 - Valor máximo = 38,9 dB,
 - Valor médio = 6,7 dB,
 - Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 47,8 dB.
- Com parâmetros de correção apresenta:
 - Valor mínimo = -19,2 dB,
 - Valor máximo = 8,9 dB,
 - Valor médio = -0,2 dB,
 - Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 28,1 dB.

O valor médio do desvio médio diminuiu de 6,9 dB e sua faixa diminuiu de 19,7 dB, com a utilização dos fatores de correção sobre a morfologia. Portanto a utilização de fatores de correção sobre a morfologia diminuiu o erro.

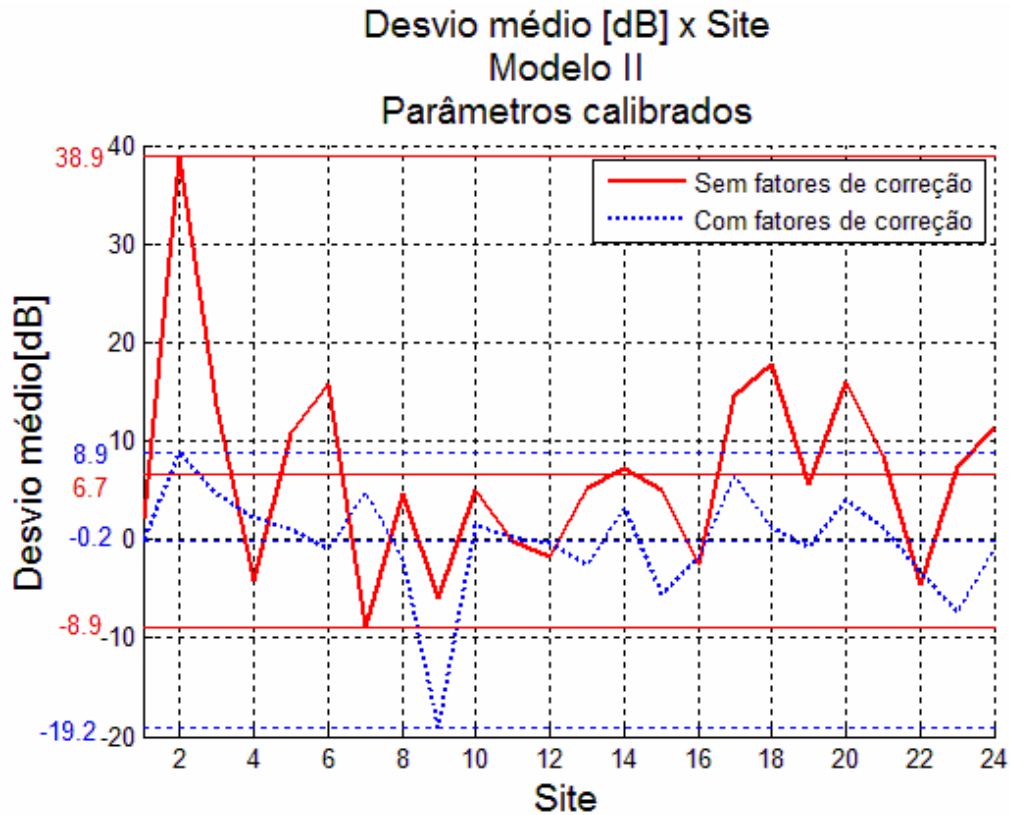


FIGURA 4-18 – Comparação, utilizando ou não fatores de correção, do desvio médio para o modelo II utilizando os parâmetros calibrados do modelo.

A FIGURA 4-19 apresenta a comparação, utilizando ou não os fatores de correção no Modelo IV, do desvio padrão nos 24 sites estudados, utilizando os parâmetros gerais de propagação do modelo, onde se observa que:

- Sem parâmetros de correção apresenta:
 - Valor mínimo = 6,5 dB,
 - Valor máximo = 19,5 dB,
 - Valor médio = 11,6 dB,
 - Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 13 dB.

- Com parâmetros de correção apresenta:
 - Valor mínimo = 5,8 dB,
 - Valor máximo = 15,6 dB,
 - Valor médio = 9,8 dB,
 - Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 9,8 dB.

O valor médio do desvio padrão diminuiu de 1,8 dB e sua faixa diminuiu de 3,2 dB, com a utilização dos fatores de correção sobre a morfologia. Portanto a utilização de fatores de correção sobre a morfologia diminuiu o erro.

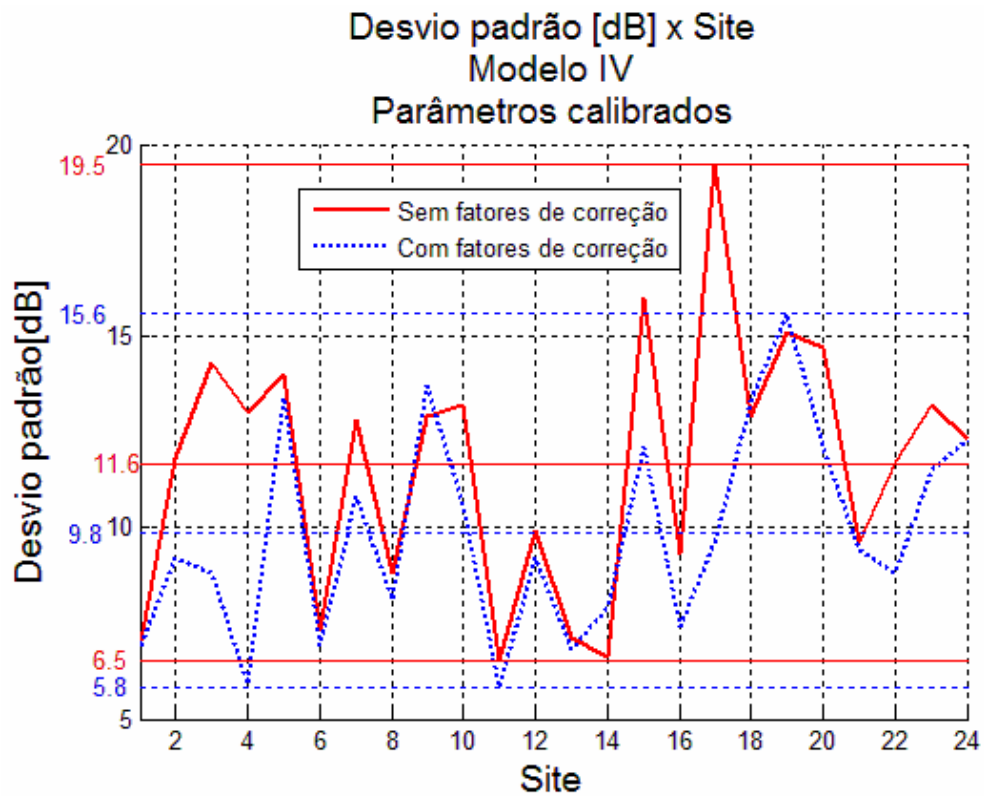


FIGURA 4-19 – Comparação, utilizando ou não fatores de correção, do desvio padrão para o modelo IV utilizando os parâmetros calibrados do modelo.

A FIGURA 4-20 apresenta a comparação, utilizando ou não os fatores de correção no Modelo IV, do desvio médio nos 24 sites estudados, utilizando os parâmetros propagação calibrados do modelo, onde se observa que:

- Sem parâmetros de correção apresenta:
 - Valor mínimo = -20,4 dB,
 - Valor máximo = 31,1 dB,

- Valor médio = -5,2 dB,
- Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 51,5 dB.
- Com parâmetros de correção apresenta:
 - Valor mínimo = -16,3 dB,
 - Valor máximo = 9,5 dB,
 - Valor médio = -3,1 dB,
 - Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 25,8 dB.

O valor médio do desvio médio diminuiu de 2,1 dB e sua faixa diminuiu de 25,7 dB, com a utilização dos fatores de correção sobre a morfologia. Portanto a utilização de fatores de correção sobre a morfologia diminuiu o erro.

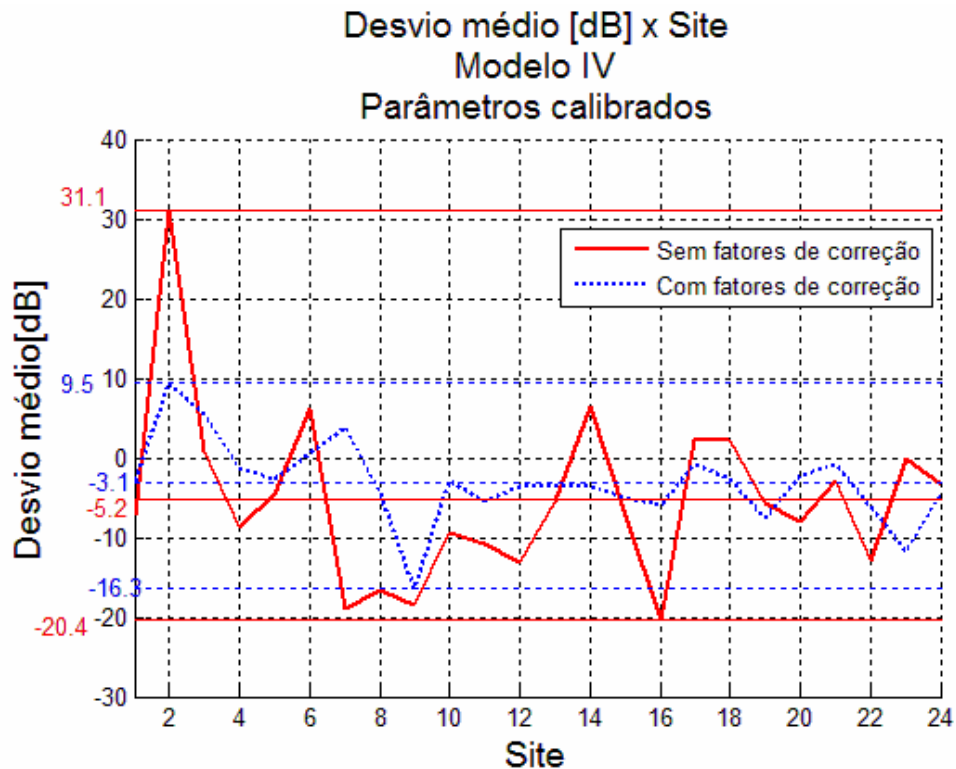


FIGURA 4-20 – Comparação, utilizando ou não fatores de correção, do desvio médio para o modelo IV utilizando os parâmetros calibrados do modelo.

A utilização dos fatores de correção sobre a morfologia no projeto pelo concepor apresenta nítida vantagem, pois os valores estimados se aproximam dos valores medidos tanto utilizando os parâmetros gerais quanto os parâmetros calibrados dos modelos.

Finalmente analisam-se os parâmetros de propagação calibrados em relação aos parâmetros gerais de propagação, verificando a diminuição no desvio médio e padrão para os três modelos sem os fatores de correção e posteriormente com os fatores de correção com o objetivo de se verificar a diminuição do erro e portanto a utilização destes parâmetros no projeto.

4.4 AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE PROPAGAÇÃO

Finalmente, neste item será feita a avaliação da utilização dos parâmetros de propagação calibrados sobre a morfologia para os três modelos, sem os fatores de correção da morfologia e posteriormente os utilizando. Para tal foram utilizadas as TABELAS 3-5, 3-6, 3-7, 3-9, 3-10 e 3-11. O objetivo é o levantamento de gráficos do *desvio padrão [dB]* versus *site*, do *desvio médio [dB]* versus *site* e finalmente do *desvio médio absoluto [dB]* versus *site*. Da análise dos gráficos apresentados será extraída a análise do erro.

O bom entendimento da FIGURA 4-21 é de fundamental importância para a compreensão da primeira parte de apresentação dos resultados. A mesma apresenta a comparação do desvio padrão para o modelo I nos 24 sites estudados utilizando os parâmetros gerais e calibrados de propagação dos modelos, sem os fatores de correção sobre a morfologia. Desprende-se desta figura:

- Parâmetros gerais têm-se:
 - Valor mínimo = 7,2 dB,
 - Valor máximo = 17,5 dB,
 - Valor médio = 11,1 dB,
 - Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 10,3 dB.
- Parâmetros calibrados têm-se:
 - Valor mínimo = 6,3 dB,
 - Valor máximo = 16 dB,
 - Valor médio = 10,1 dB,
 - Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 9,7 dB.

O valor médio do desvio padrão diminuiu de 1,0 dB com a utilização dos parâmetros calibrados de propagação, portanto o erro diminuiu.

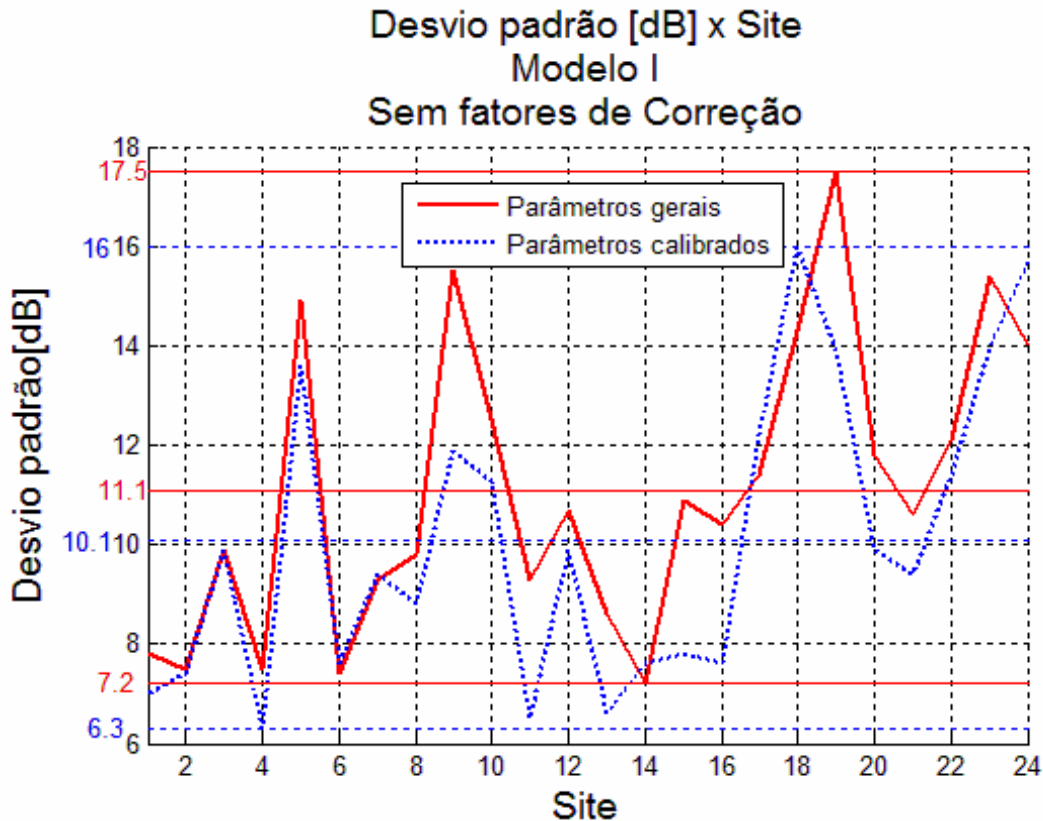


FIGURA 4-21 – Comparação do desvio padrão para o modelo I entre os parâmetros gerais e calibrados, sem o uso dos fatores de correção.

A FIGURA 4-22 apresenta a comparação do desvio médio nos 24 sites estudados, utilizando os parâmetros gerais e calibrados do modelo I, sem o uso dos fatores de correção, onde se observa que com:

- Parâmetros gerais têm-se:
 - Valor mínimo = -40 dB,
 - Valor máximo = -3,5 dB,
 - Valor médio = -20,5 dB,
 - Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 36,5 dB.
- Parâmetros calibrados têm-se:
 - Valor mínimo = -42,3 dB,
 - Valor máximo = 18,5 dB,
 - Valor médio = -9,3 dB,
 - Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 60,8 dB.

O valor médio do desvio médio diminuiu de 11,2 dB com a utilização parâmetros calibrados de propagação, portanto o erro diminuiu.

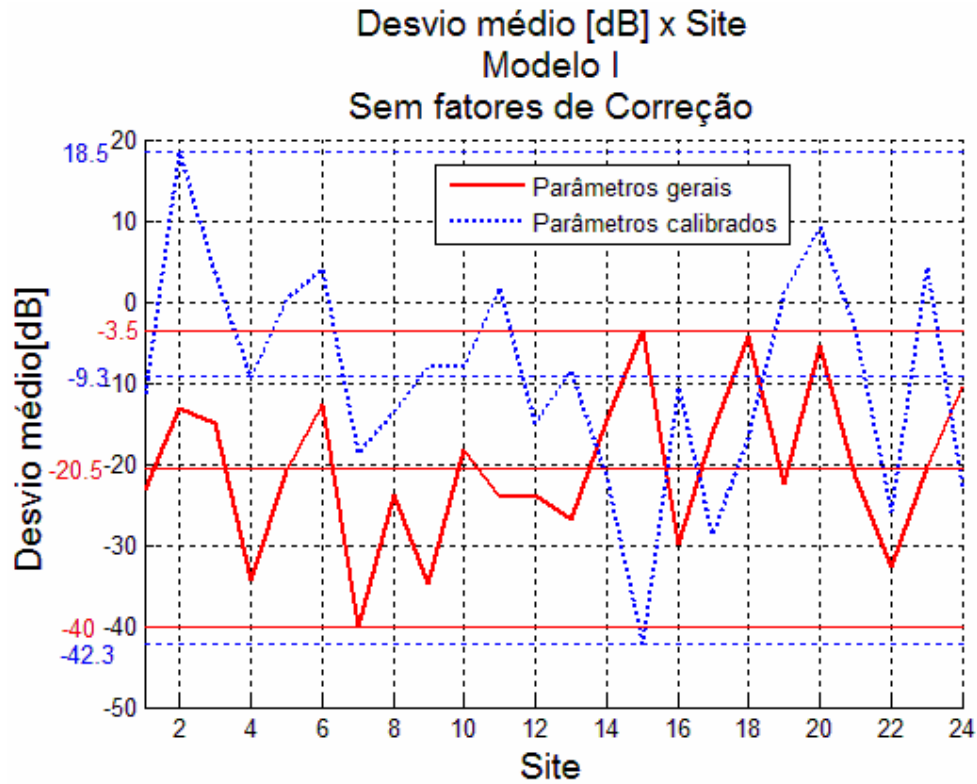


FIGURA 4-22 – Comparação do desvio médio para o modelo I entre os parâmetros gerais e calibrados, sem o uso dos fatores de correção.

A FIGURA 4-23 apresenta a comparação do desvio padrão nos 24 sites estudados, utilizando os parâmetros gerais e calibrados do modelo II, sem o uso dos fatores de correção, onde se observa que com:

- Parâmetros gerais têm-se:
 - Valor mínimo = 3,2 dB,
 - Valor máximo = 16,8 dB,
 - Valor médio = 10 dB,
 - Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 13,6 dB.
- Parâmetros calibrados têm-se:
 - Valor mínimo = 3,2 dB,
 - Valor máximo = 16,8 dB,

- Valor médio = 9,9 dB,
- Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 13,6 dB.

O valor médio do desvio padrão diminuiu de 0,1 dB com a utilização dos parâmetros calibrados de propagação, portanto o erro diminuiu.

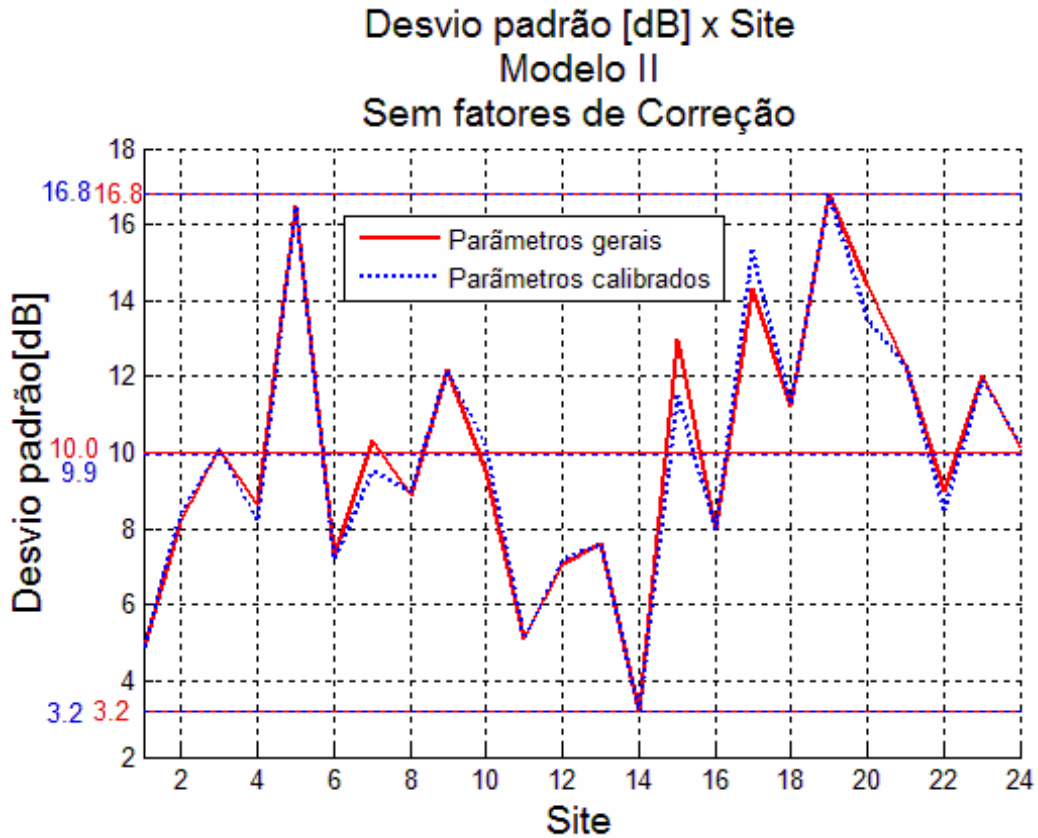


FIGURA 4-23 – Comparação do desvio padrão para o modelo II entre os parâmetros gerais e calibrados, sem o uso dos fatores de correção.

A FIGURA 4-24 apresenta a comparação do desvio médio nos 24 sites estudados, utilizando os parâmetros gerais e calibrados do modelo II, sem o uso dos fatores de correção, onde se observa que com:

- Parâmetros gerais têm-se:
 - Valor mínimo = -28,6 dB,
 - Valor máximo = 19,7 dB,
 - Valor médio = -11,6 dB,
 - Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 48,3 dB.

- Parâmetros calibrados têm-se:
 - Valor mínimo = -8,9 dB,
 - Valor máximo = 38,9 dB,
 - Valor médio = 6,7 dB,
 - Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 47,8 dB.

O valor médio do desvio médio diminuiu de 3,9 dB com a utilização dos parâmetros calibrados de propagação, portanto o erro diminuiu.

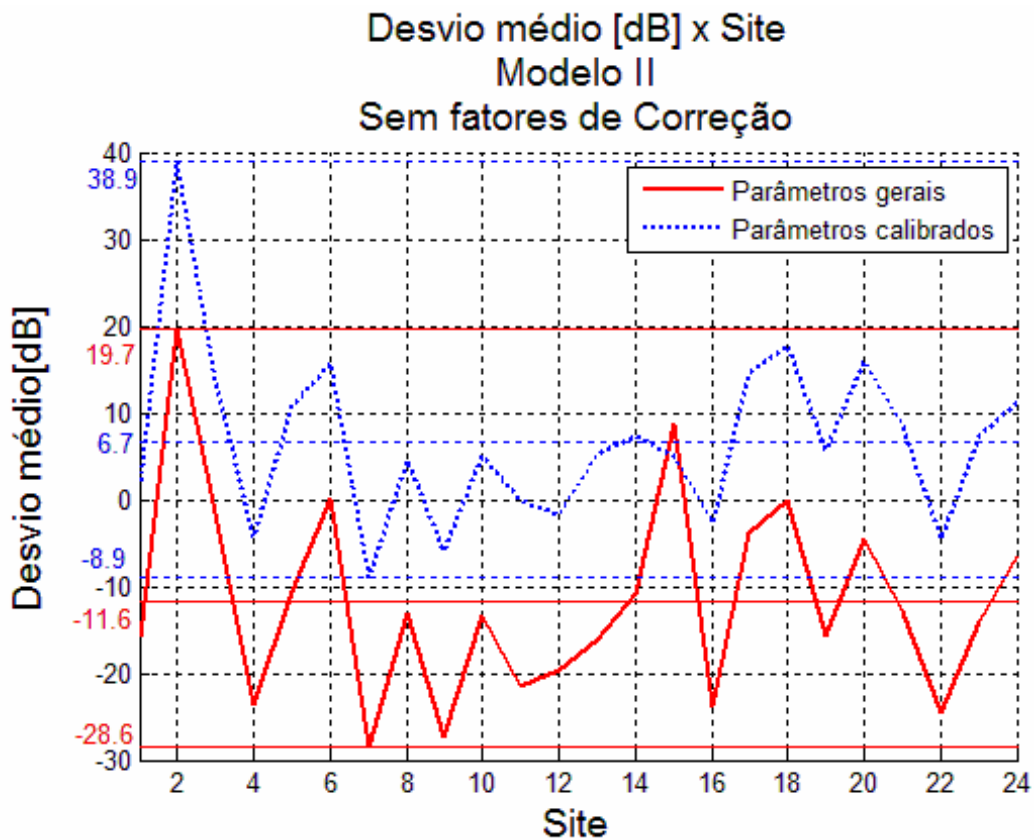


FIGURA 4-24 – Comparação do desvio médio para o modelo II entre os parâmetros gerais e calibrados, sem o uso dos fatores de correção.

A FIGURA 4-25 apresenta a comparação do desvio padrão nos 24 sites estudados, utilizando os parâmetros gerais e calibrados do modelo IV, sem o uso dos fatores de correção, onde se observa que com:

- Parâmetros gerais têm-se:
 - Valor mínimo = 6,8 dB,

- Valor máximo = 19,1 dB,
- Valor médio = 11,8 dB,
- Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 12,3 dB.
- Parâmetros calibrados têm-se:
 - Valor mínimo = 6,5 dB,
 - Valor máximo = 19,5 dB,
 - Valor médio = 11,6 dB,
 - Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 13 dB.

O valor médio do desvio padrão diminuiu de 0,2 dB com a utilização dos parâmetros calibrados de propagação, portanto o erro diminuiu.

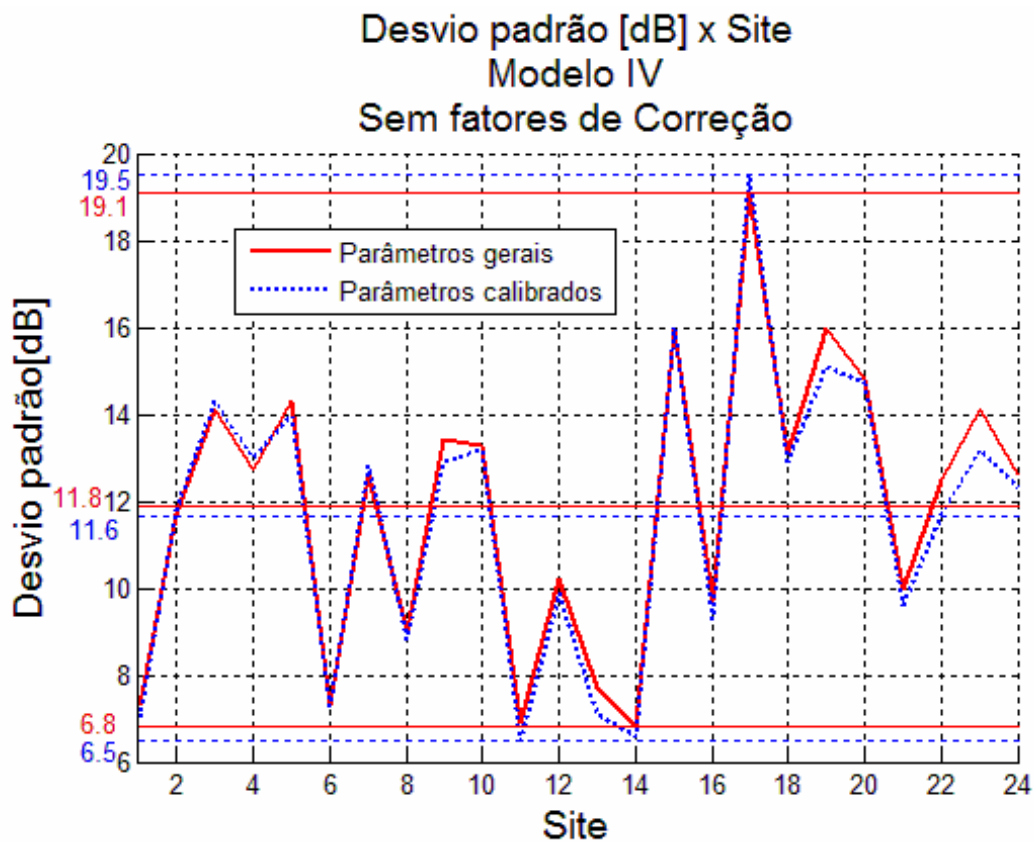


FIGURA 4-25 – Comparação do desvio padrão para o modelo IV entre os parâmetros gerais e calibrados, sem o uso dos fatores de correção.

A FIGURA 4-26 apresenta a comparação do desvio médio nos 24 sites estudados, utilizando os parâmetros gerais e calibrados do modelo IV, sem o uso dos fatores de correção, onde se observa que com:

- Parâmetros gerais têm-se:
 - Valor mínimo = -25,2 dB,
 - Valor máximo = 29 dB,
 - Valor médio = -9,7 dB,
 - Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 54,2 dB.
- Parâmetros calibrados têm-se:
 - Valor mínimo = -20,4 dB,
 - Valor máximo = 31,1 dB,
 - Valor médio = -5,2 dB,
 - Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 51,5 dB.

O valor médio do desvio médio diminuiu de 4,5 dB com a utilização dos parâmetros de propagação calibrados.

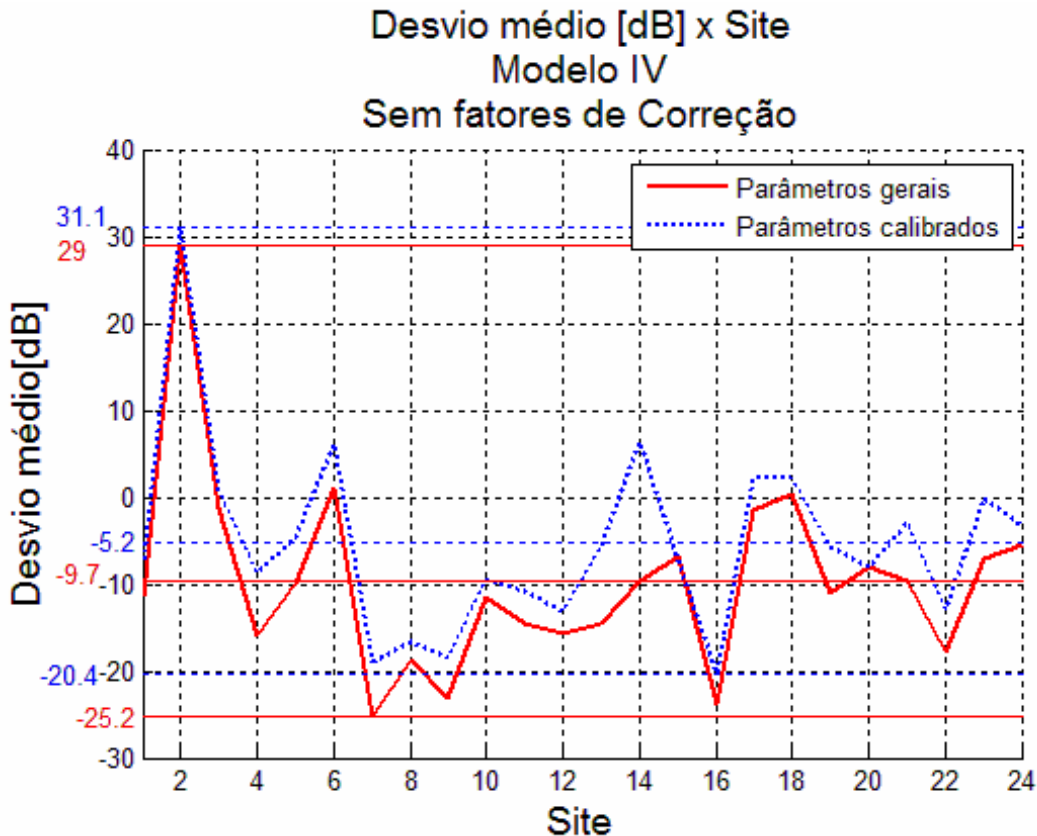


FIGURA 4-26 – Comparação do desvio médio para o modelo IV entre os parâmetros gerais e calibrados, sem o uso dos fatores de correção.

Antes da apresentação dos resultados com os fatores de correção sobre a morfologia, convém dizer que sem a utilização dos fatores de correção sobre a morfologia os parâmetros de propagação encontrados na calibração, chamados de parâmetros calibrados, apresentaram uma melhor *performance*, pois o valor médio do desvio padrão e o valor médio absoluto foram menores (menor erro) em todos os modelos.

A análise realizada a seguir é idêntica à análise realizada anteriormente com a diferença que a partir de agora serão utilizados os fatores de correção sobre a morfologia. A FIGURA 4-27 apresenta a comparação do desvio padrão nos 24 sites estudados, utilizando os parâmetros gerais e calibrados do modelo I, com o uso dos fatores de correção, onde se observa que com:

- Parâmetros gerais têm-se:
 - Valor mínimo = 6,6 dB,

- Valor máximo = 15,1 dB,
- Valor médio = 10 dB,
- Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 8,5 dB.
- Parâmetros calibrados têm-se:
 - Valor mínimo = 6,3 dB,
 - Valor máximo = 14,5 dB,
 - Valor médio = 9,7 dB,
 - Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 8,2 dB.

O valor médio do desvio padrão diminuiu de 0,3 dB com a utilização dos parâmetros calibrados de propagação, portanto o erro diminuiu.

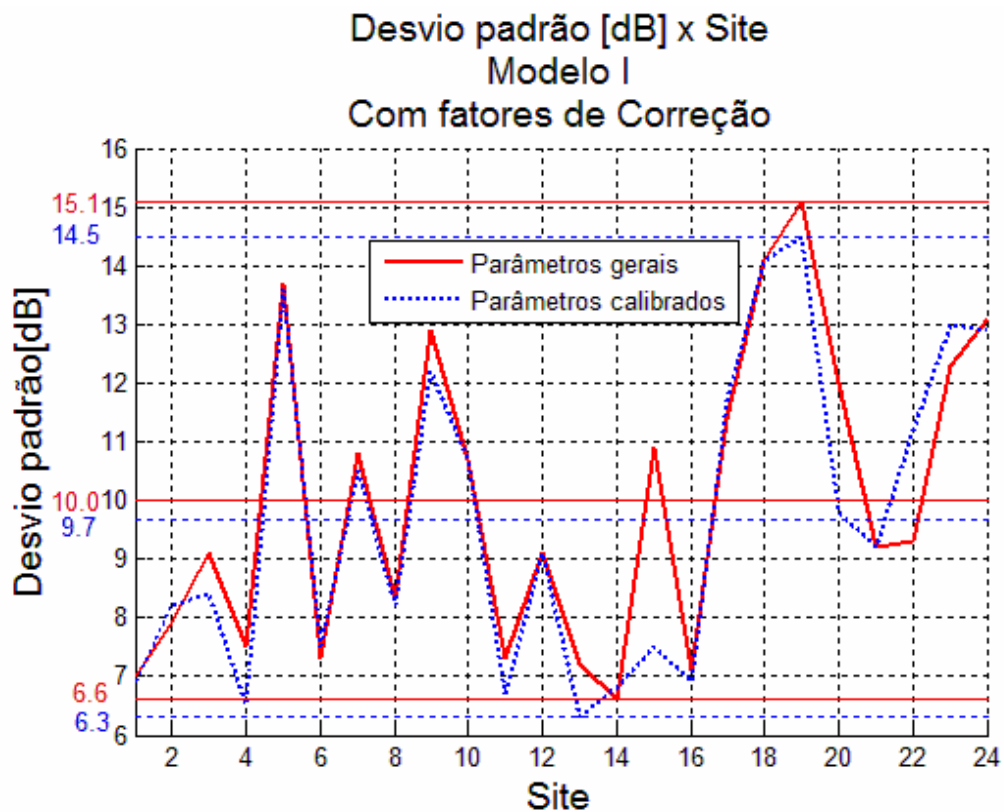


FIGURA 4-27 – Comparação do desvio padrão para o modelo I entre os parâmetros gerais e calibrados, com o uso dos fatores de correção.

A FIGURA 4-28 apresenta a comparação do desvio médio nos 24 sites estudados, utilizando os parâmetros gerais e calibrados do modelo I, com o uso dos fatores de correção, onde se observa que com:

- Parâmetros gerais têm-se:
 - Valor mínimo = -26,2 dB,
 - Valor máximo = 6,2 dB,
 - Valor médio = -6 dB,
 - Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 32,4 dB.
- Parâmetros calibrados têm-se:
 - Valor mínimo = -18,3 dB,
 - Valor máximo = 5,6 dB,
 - Valor médio = -3,9 dB,
 - Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 23,9 dB.

O valor médio do desvio médio diminuiu de 4,1 dB com a utilização dos parâmetros calibrados de propagação, portanto o erro diminuiu.

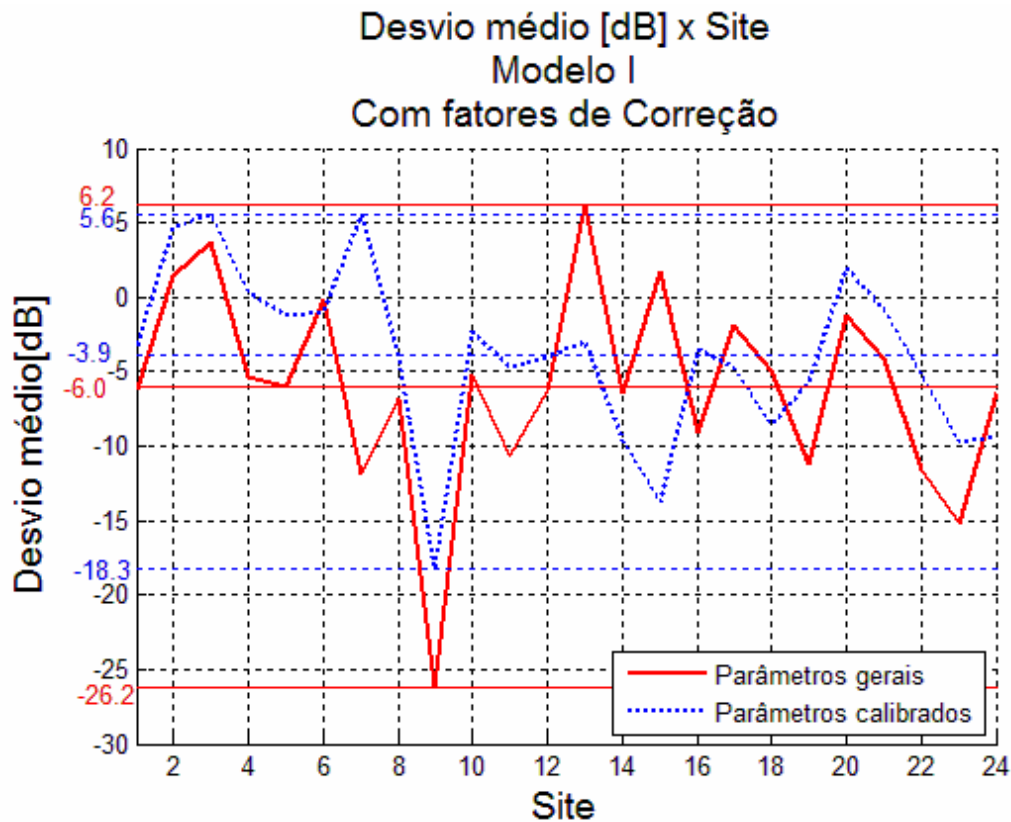


FIGURA 4-28 – Comparação do desvio médio para o modelo I entre os parâmetros gerais e calibrados, com o uso dos fatores de correção.

A FIGURA 4-29 apresenta a comparação do desvio padrão nos 24 sites estudados, utilizando os parâmetros gerais e calibrados do modelo II, com o uso dos fatores de correção, onde se observa que com:

- Parâmetros gerais têm-se:
 - Valor mínimo = 2,9 dB,
 - Valor máximo = 14,8 dB,
 - Valor médio = 9,3 dB,
 - Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 11,9 dB.
- Parâmetros calibrados têm-se:
 - Valor mínimo = 3,4 dB,
 - Valor máximo = 15 dB,
 - Valor médio = 8,9 dB,
 - Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 11,6 dB.

O valor médio do desvio padrão diminuiu de 0,4 dB com a utilização dos parâmetros calibrados de propagação, portanto o erro diminuiu.

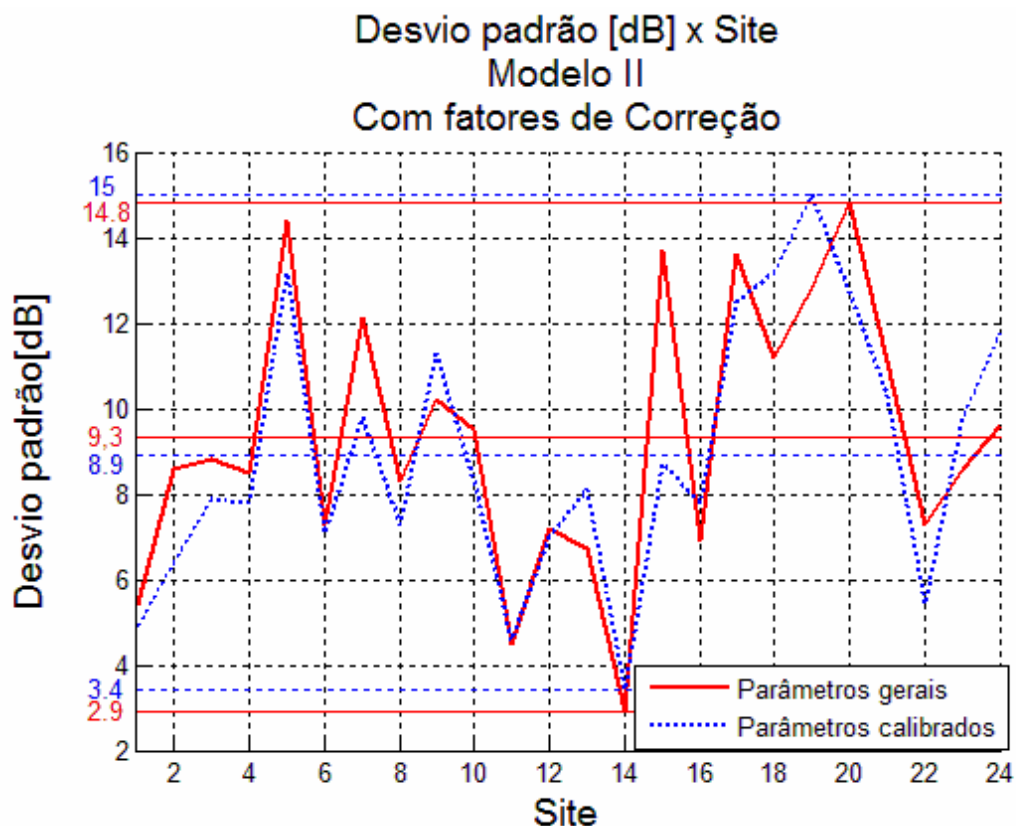


FIGURA 4-29 – Comparação do desvio padrão para o modelo II entre os parâmetros gerais e calibrados, com o uso dos fatores de correção.

A FIGURA 4-30 apresenta a comparação do desvio médio nos 24 sites estudados, utilizando os parâmetros gerais e calibrados do modelo II, com o uso dos fatores de correção, onde se observa que com:

- Parâmetros gerais têm-se:
 - Valor mínimo = -20,2 dB,
 - Valor máximo = 7,7 dB,
 - Valor médio = -2,4 dB,
 - Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 27,9 dB.
- Parâmetros calibrados têm-se:
 - Valor mínimo = -19,2 dB,
 - Valor máximo = 8,9 dB,
 - Valor médio = -0,2 dB,
 - Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 28,1 dB.

O valor médio do desvio médio diminuiu de 2,2 dB com a utilização dos parâmetros calibrados de propagação, portanto o erro diminuiu.

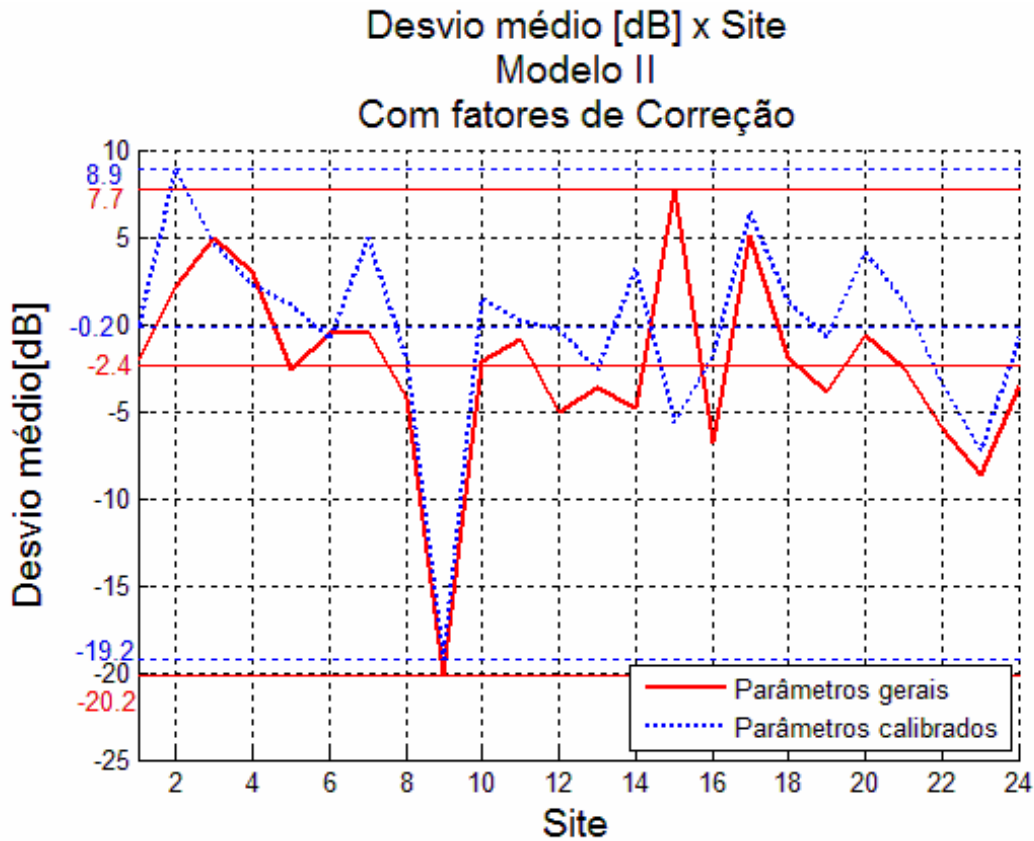


FIGURA 4-30 – Comparação do desvio médio para o modelo II entre os parâmetros gerais e calibrados, com o uso dos fatores de correção.

A FIGURA 3-31 apresenta a comparação do desvio padrão nos 24 sites estudados, utilizando os parâmetros gerais e calibrados do modelo IV, com o uso dos fatores de correção, onde se observa que com:

- Parâmetros gerais têm-se:
 - Valor mínimo = 5,9 dB,
 - Valor máximo = 17,9 dB,
 - Valor médio = 10,1 dB,
 - Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 12 dB.
- Parâmetros calibrados têm-se:
 - Valor mínimo = 5,8 dB,

- Valor máximo = 15,6 dB,
- Valor médio = 9,8 dB,
- Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 9,8 dB.

O valor médio do desvio padrão diminuiu de 0,3 dB com a utilização dos parâmetros calibrados de propagação, portanto o erro diminuiu.

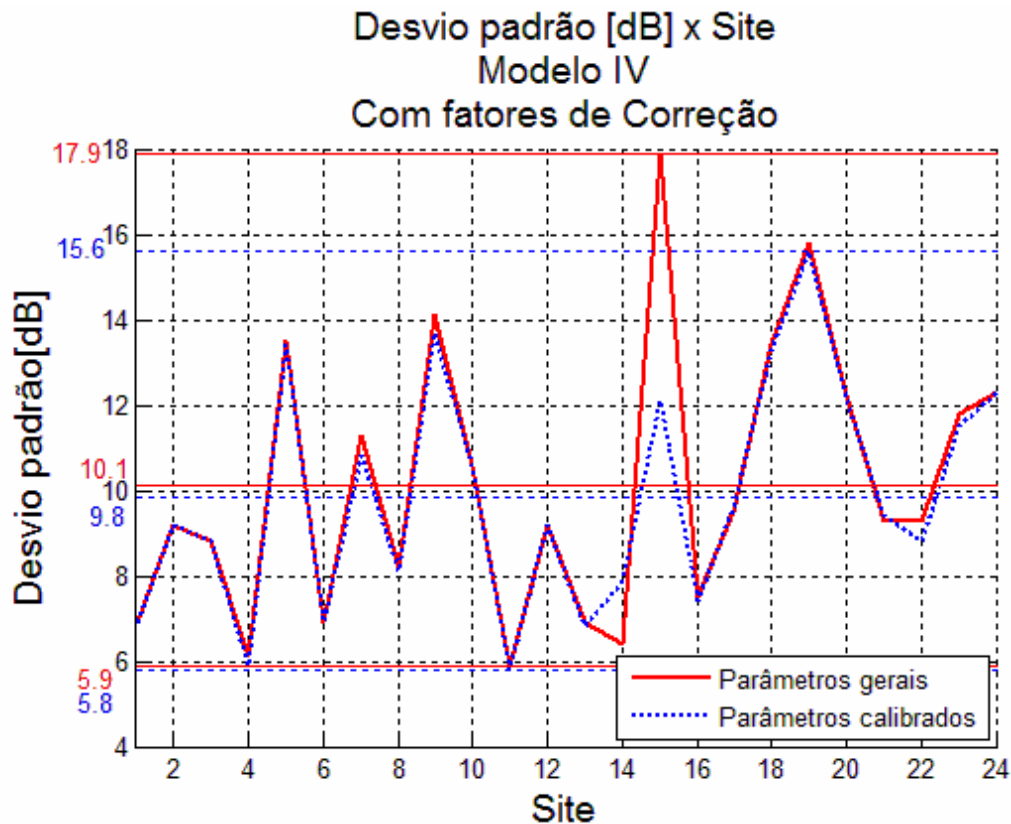


FIGURA 4-31 – Comparação do desvio padrão para o modelo IV entre os parâmetros gerais e calibrados, com o uso dos fatores de correção.

A FIGURA 3-32 apresenta a comparação do desvio médio nos 24 sites estudados, utilizando os parâmetros gerais e calibrados do modelo IV, com o uso dos fatores de correção, onde se observa que com:

- Parâmetros gerais têm-se:
 - Valor mínimo = -17,4 dB,
 - Valor máximo = 12,6 dB,
 - Valor médio = -3,5 dB,

- Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 30 dB.
- Parâmetros calibrados têm-se:
 - Valor mínimo = -16,3 dB,
 - Valor máximo = 9,5 dB,
 - Valor médio = -3,1 dB,
 - Faixa (valor máximo – valor mínimo) = 25,8 dB.

O valor médio do desvio médio diminuiu de 0,4 dB com a utilização dos parâmetros calibrados de propagação, portanto o erro diminuiu.

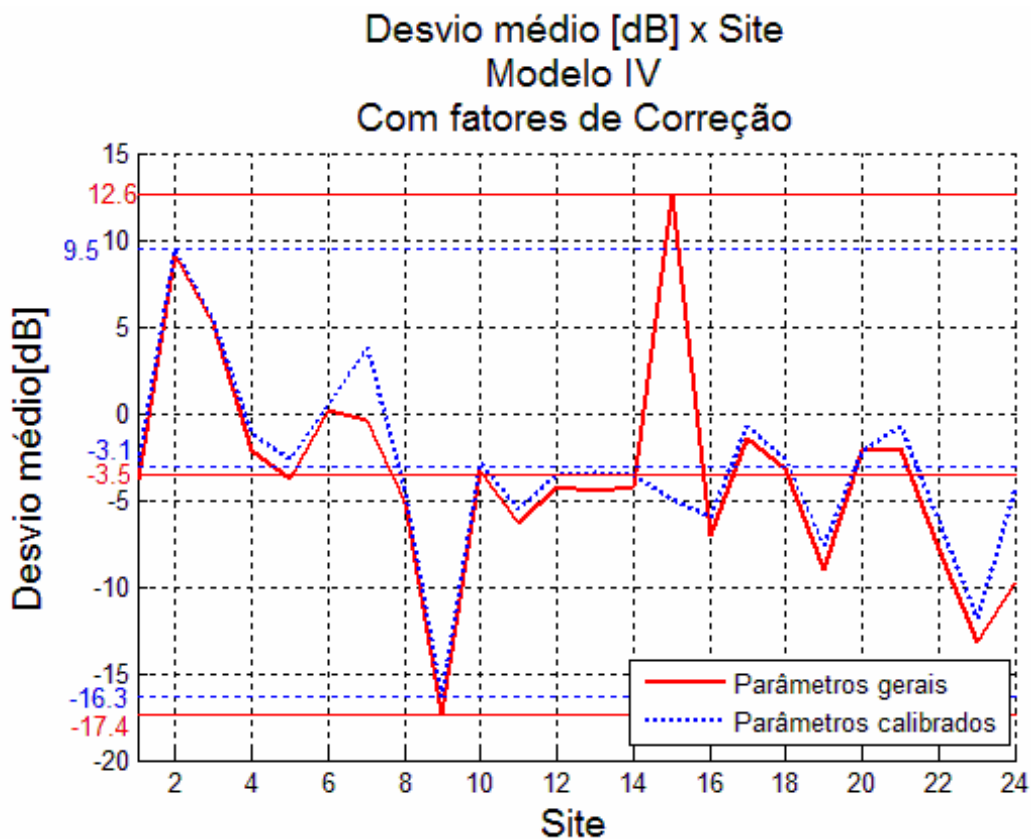


FIGURA 4-32 – Comparação do desvio médio para o modelo IV entre os parâmetros gerais e calibrados, com o uso dos fatores de correção.

Ocorreu uma diminuição no desvio padrão, no desvio médio e no desvio médio absoluto em todos os modelos, com e sem a utilização dos fatores de correção sobre a morfologia, logo

uma diminuição do erro nos valores estimados, portanto pode-se considerar validada a metodologia e o conceitor do projeto pode aplicar os parâmetros de propagação encontrados.

4.5 CONCLUSÃO

Este capítulo mostrou a validação da metodologia e os parâmetros de propagação encontrados para cada modelo, mostrou também que utilizando os parâmetros gerais dos modelos e os parâmetros encontrados na calibração, ocorreu uma diminuição do erro entre os valores simulados e os valores medidos, então considera-se que estes parâmetros de propagação podem ser utilizados em um projeto de concepção de enlace tanto na região urbana quanto na região urbana densa da cidade de Curitiba.

Foi visto também que o erro entre os valores estimados e os valores medidos podem ser minimizados através da utilização dos fatores de correção sobre a morfologia.

Finalmente, pôde também ser visto neste capítulo que qualquer um dos três modelos podem ser utilizados na realização de um novo projeto bem como a ampliação de uma rede já existente inserção. Em qualquer dos casos a ser considerado a margem de erro deverá girar em torno de 8 dB.

CAPÍTULO 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O enfoque principal deste capítulo é apresentar as considerações finais sobre os aspectos mais significativos do desenvolvimento deste trabalho e apresentar as principais propostas para trabalhos futuros para o desenvolvimento desta linha de pesquisa.

Nesta etapa final da dissertação, faz-se uma análise global do trabalho realizado, dos resultados obtidos dentro da idéia inicial proposta e conclui-se com as possíveis propostas de trabalho futuro sob pontos de interesse do laboratório de telecomunicações do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná.

O objetivo pretendido neste trabalho era a análise de comportamento de modelos de propagação na área urbana e urbana densa da capital paranaense em uma faixa específica de 1800 MHz. Onde pode-se verificar que os três modelos estudados apresentaram bom desempenho.

Para a consecução dos objetivos pretendidos neste trabalho, inicialmente foram apresentados de modo tutorial os principais conceitos básicos de rádio propagação, onde o canal de rádio propagação foi caracterizado. Esta caracterização possibilitou não só a compreensão do porquê do uso dos modelos de propagação como também forneceu a base para uma melhor compreensão dos mesmos. Foi possível então de se verificar os principais parâmetros que devem ser determinados e fixados nos modelos para permitir o dimensionamento que caracterizam um canal de rádio propagação. A importância de uma base de dados de topografia e morfologia confiável e se possível bem detalhada, para que os erros entre os valores medidos e os estimados possam ser diminuídos foram fortemente explicitadas.

Após, foi feita toda a explicação sobre os porquês de uma predição de sinal. Para tal utilizando-se os conceitos dos modelos de propagação apresentados foram realizadas as simulações na região pretendida. Observar que os dados utilizados ao longo da dissertação são

dados aplicáveis em macro-células e em ambientes *outdoors*, ou seja, fora das edificações, o que de certa forma limita a escolha do modelo de propagação. Ressalta-se que uma outra limitação deste trabalho foi o número de pontos medidos utilizados para a calibração que não pode ultrapassar 91.000 pontos.

Não obstante, para uma melhor compreensão sobre a escolha e determinação dos modelos utilizados foi apresentada toda uma metodologia de concepção de *radio-predição* onde se destacou os passos a serem seguidos para a análise e a compreensão do erro medido e do erro proveniente da estimativa do sinal. Os procedimentos necessários para a compreensão da calibração, a utilização de fatores de correção como forma de melhoria do desempenho do projeto dentre outros, todos esses considerados como necessários para se alcançar o objetivo deste trabalho.

Finalmente foi feita a validação da metodologia onde os parâmetros de propagação para os modelos estudados foram obtidos e onde também podem ser aplicados na realização do projeto na área urbana e urbana densa da capital.

PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

Como perspectivas futuras são feitas as seguintes sugestões:

- Estudo de outros modelos de propagação e comparação com resultados obtidos neste trabalho;
- Estudo de outras morfologias, como vegetação densa, adotando a metodologia e encontrando os parâmetros de propagação para estas;
- Estudo e dimensionamento de enlaces para serviço móvel pessoal adotando os parâmetros encontrados;
- Desenvolvimento de um modelo de propagação aplicável à área do trabalho e faixa de frequência.
- Desenvolvimento de um algoritmo matemático para calibração dos modelos.

REFERÊNCIA GERAL

Referências Utilizadas nos Capítulos

CAPÍTULO 1

- [1-1] - SILVA, Gilberto e BARRADAS, Ovídio., “Sistemas Radiovisibilidade”, vol. 1, 2a edição, EMBRATEL, 1978, pp 17 a 64.
- [1-2] –RIBEIRO, José Antonio Justino, “ Propagação de Ondas Eletromagnéticas: Princípios e Aplicações”, 1. ed, Érica, 2004, pp 163 a 204, 241 a 270
- [1-3] –HALL, M. P. M., BARCLAY, L. W. e Hewitt M. T., “Propagation of Radiowaves”, British Library, 1996, 1. ed, pp 9 a 22, 38 a 58 e 60 a 102
- [1-4] –BOSCO, Leung, “ VLSI for Wireless Communication”, 1. ed, Prentice Hall, 2002, pp 15 a 38

CAPÍTULO 2

- [2-1] BERTONI H. L., “Radio Propagation for Modern Wireless Systems”, Upper Saddle River, Prentice Hall PTR, 2000 pp 90-92
- [2-2] K. Low, “Comparison of Urban Propagation Models with CWMeasurements,” IEEE Vehicular Technology Sociep 42nd VTS Conference. Frontiers of Technology. From Pioneers to the 21st Century, 2, 1992, pp. 936-942.
- [2-3] Y. Okumura, E. Ohmori, T. Kawano, and K. Fukuda, “Field strength and its variability in VHF and UHF land-mobile radio service,” Review Electrical Communication Laboratory, vol. 16, pp. 825-873, 1968.
- [2-4] J. Minseok, L. Bomson, “Comparison between path-loss prediction models for wireless telecommunication system design”; Antennas and Propagation Society international Symposium, 2001. IEEE Volume 2, 8-13 July 2001 pp 186 - 189
- [2-5] E. Nazar, M. A. Salam, A. Al-Lawati, O. Al-Qasmi, M. Al-Gheithi, Z. Nadir. “Modification of an Open Area Okumura-Hata Propagation Model Suitable for Oman”; TENCON 2005 IEEE Region 10 Nov. 2005 pp 1 - 4
- [2-6] M. Hata, “Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Service,” IEEE Transactions on Vehicular Technology, VT-29,3, 1980, pp. 317-325.

- [2-7] A. Medeisis, A. Kajackas, "On the use of the universal Okumura-Hata propagation prediction model in rural areas" Vehicular Technology Conference Proceedings, 2000. VTC 2000-Spring Tokyo. 2000 IEEE 51st, Volume 3, 15-18 May 2000 pp 1815 – 1818.
- [2-8] G.Y Delisle, J. P. Lefevre, M. Lecours, J. Y. Chouinard, "Propagation loss prediction: A comparative study with application to the mobile radio channel, Vehicular Technology, IEEE Transactions on Volume 34, Issue 2, May 1985 pp 86 - 96
- [2-9] J. Waltisch and H. L. Bertoni, "A Theoretical Model of UHF Propagation in Urban Environments," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, AP-36, 12, 1988, pp. 1788-1796.
- [2-10] F. Ikegami and S. Yoshida, "Analysis of multipath propagation structure in urban mobile radio environments," IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. AP-28, pp. 531 - 537, 1980.
- [2-11] F. Ikegami, S. Yoshida, T. Takenchi, and M. Umehira, "Propagation factors controlling mean field strength on urban streets," IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. AP-32, 1984.
- [2-12] H. L. Bertoni, W. Honcharenko, L. R. Macel, and H. H. Xia, "UHF Propagation Prediction for Wireless Personal Communications," Proceedings of the IEEE, 1994, pp. 1333-1359.
- [2-13] A.P. Garcia, H Ortega, A. Navarro, A.H. Rodriguez, "Effect of terrain on electromagnetic propagation in urban environments on the Andean region, using the COST231-Walfisch-Ikegami model and GIS planning tools Antennas and Propagation", 2003. (ICAP 2003). Twelfth International Conference on (Conf. Publ. No. 491) Volume 1, 31 March-3 April 2003 pp :270 - 275
- [2-14] W. C. Lee and Y. S. Yeh, "On the Estimation of the Second- Order Statistics of Log Normal Fading in Mobile Radio Environment, IEEE Transactions on Communications Com-22 (June 1974): 869-873.
- [2-15] W. C. Y. Lee, "Cochannel interference reduction by using a notch in tilted antenna pattern," in IEEE VTC-35th, Boulder CO, May 1985, pp. 61-72.
- [2-16] W.C.Y. Lee, "Estimate of Local Average Power of a Mobile Radio Signal", IEEE Trans. Veh. Technol., Vol. VT-34, No 1, February 1985, pp. 22-27.
- [2-17] IEEE Vehicular Technology Society Committee on Radio Propagation, "Coverage Prediction for Mobile Radio Systems Operating in the 800-1900 MHz Frequency Range," IEEE Transactions on Vehicular Technology, VT-37, 1, February 1988, pp. 3-72.

- [2-18] Erceg, V.; Greenstein, L.J.; Tjandra, S.Y.; Parkoff, S.R.; Gupta, A.; Kulic, B.; Julius, A.A.; Bianchi, R. “An empirically based path loss model for wireless channels in suburban environments” Selected Areas in Communications, IEEE Journal on Volume 17, Issue 7, Jul 1999, pp 1205 – 1211
- [2-19] V. Erceg, S. J. Fortune, J. Ling, A. J. Rustako Jr., and R. A. Valenzuela, “Comparisons of a Computer-Based Propagation Prediction Tool with Experimental Data Collected in Urban Microcellular Environments,” IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 15,4, May 1997, pp. 677-684.
- [2-20] U. Liebenow and P. Kuhlman, “A three-dimensional wave propagation model for macrocellular mobile communication networks in comparison with measurements,” in Proc. IEEE Veh. Technol. Conf., 1996, pp. 1623–1627.
- [2-21] V. Erceg, S. Ghassemzadeh, M. Taylor, Li, D.; D.L. Schilling, “Urban/suburban out-of-sight propagation modeling”, Communications Magazine, IEEE Volume 30, Issue 6, June 1992 pp 56 – 61

CAPÍTULO 3

[3-1] – GOUVEIA, Fabrício C. “ Proposta de uma metodologia de dimensionamento de um sistema GSM, com análise de caso para uma região urbana em Curitiba.”, dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, 2003.

[3-2] – STAHLKE, Ronald F. “Análise e estudo da influência dos efeitos atmosféricos na propagação de ondas eletromagnéticas na faixa SHF: estudo de caso e aplicação a um enlace operando em 23,6 GHz.”, dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, 2006.

[3-3] – FELICE, Fernando. “Análise do desempenho de enlaces ponto-a-ponto utilizando a faixa de frequência não licenciada de 2,4 GHz em tecnologia spread spectrum.”, dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, 2005.

[3-4] – SARAIVA, Ernandes A. “Determinação da influência do radome na relação de ganho entre lóbulos da antena de radar meteorológico.”, dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, 2006.

Artigo defendido em congresso internacional durante o desenvolvimento da dissertação

- [01] M. A. BETINI PEREIRA, H. TERTULIANO FILHO, C. A. DARTORA, H. SILVA MATTOS, A. YOSHIO IGARASHI.. **Proposed wireless system technique using a free Propagation model for measurement of signal level Contents in a real wireless system.** IASTED 2007. **Antennas, Radar, and Wave Propagation 2007** Montreal, Quebec, Canadá.