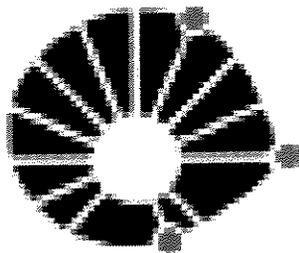


UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS



FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
COMPUTAÇÃO

DEPARTAMENTO DE COMUNICAÇÕES

**COBERTURA CELULAR:
ESTATÍSTICAS DE LONGO PRAZO E
AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE
PREDIÇÃO**

Frederico de Paula Alves

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA À FACULDADE
DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO COMO
PARTE DOS REQUISITOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Orientador:

Prof. Dr. Michel Daoud Yacoub

Banca Examinadora:

Prof. Michel Daoud Yacoub

Prof. César Kyn D'Ávila

Prof. Lee Luan Ling

Este exemplar corresponde a redação final da tese
defendida por Frederico de Paula Alves
em 22/02/2000 e aprovada pela Comissão
Julgada em _____
M. Daoud Yacoub
Orientador

Fevereiro de 2000

200017246



UNIDADE	BC		
N.º CHAMADA:	T/Unicamp		
	AL87c		
V.	Ex.		
TOMBO BC/	43046		
PROC.	16-278100		
C	<input type="checkbox"/>	D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREC@	R\$ 11,00		
DATA	10/11/00		
N.º CPD			

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL...
SEÇÃO CIRCULANTE?

CM-00154328-6

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

AL87c

Alves, Frederico de Paula
Cobertura celular: estatística de longo prazo e avaliação de métodos de predição / Frederico de Paula Alves.--Campinas, SP: [s.n.], 2000.

Orientador: Michel Daoud Yacoub
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Telefonia celular. 2. Sistemas de comunicação móvel. 3. Ondas de rádio - Propagação. 4. Óptica geométrica. I. Yacoub, Michel Daoud. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

ABSTRACT

This work aimed the presentation, analysis and validation of methods for computing path loss of radio signals within the frequency range used by cellular mobile radio systems.

The methods herein presented are characterized by taking into account as the main contributor for path loss, the propagation loss due to multiple diffraction, as modeled in the work of Vogler, Walfisch, Bertoni, Xia and Maciel.

To validate the presented methods, some field measurements, conducted in cooperation with a local cellular service provider in various regions of the city of Campinas were used.

Such procedure, not only allowed the behavior analysis of each method in different situations but also the evaluation of some important statistical parameters that help to describe the mobile radio environment in the city of Campinas.

Keywords: Cellular systems, Radio propagation, Path loss, Multiple diffraction.

RESUMO

Este trabalho objetivou a apresentação, análise e validação de métodos para o cálculo da perda de percurso de sinais de rádio nas faixas de frequência utilizadas pelos sistema de telefonia móvel celular.

Os métodos apresentados caracterizam-se por contabilizar como contribuição fundamental na perda de percurso, a perda de propagação por difração múltipla, como modelado nos trabalhos de Vogler, Walfisch, Bertoni, Xia e Maciel.

Para a validação dos métodos apresentados, foram utilizadas medidas de campo feitas em diversas regiões da cidade de Campinas em cooperação com uma operadora local de telefonia celular.

Tal procedimento proporcionou não só a análise do comportamento dos métodos apresentados em diferentes situações e ambientes, bem como a obtenção de importantes parâmetros estatísticos que ajudam a descrever o ambiente rádio móvel na cidade de Campinas.

Palavras chave: Sistemas celulares, Rádio propagação, Perda de percurso, Difração múltipla.

DEDICATÓRIA

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

À meus pais, Etheocles e Sônia.

À minha esposa, Marely.

Ao meu filho, Bruno, e à tudo mais que o futuro nos reserva.

“Se o Senhor não edificar a casa, em vão trabalham os que a edificam”

Sl 127:1

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus por tudo que sou e pela dádiva de aprender.

Ao Prof. Michel Daoud Yacoub pela honrosa oportunidade que me ofereceu e também pela paciência e confiança, quase sempre maiores do que o merecido.

À UNICAMP, à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação e ao CNPq pelo ambiente propício e recursos necessários.

A Tess S/A pelos equipamentos e dados cedidos para este trabalho.

À minha família, em especial aos meus pais, cujo sacrifício me permitiu chegar até aqui.

À minha esposa pelo apoio incondicional, paciência e amor sem limites.

Aos amigos sempre presentes Paula Renata Cerdeira Gomez , Armando César Mazoni, Edilene e André Boralli

Respeitosamente, ao povo do Estado de São Paulo, emérito mantenedor da Universidade Estadual de Campinas

ÍNDICE

ABSTRACT.....	ii
RESUMO.....	i
DEDICATÓRIA.....	ii
AGRADECIMENTOS.....	iii
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 OBJETIVOS.....	3
1.2 ESTRUTURA.....	4
2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS.....	5
2.1 O CONCEITO CELULAR.....	6
2.2 Fenômenos que Influenciam a Rádio-propagação.....	6
2.2.1 Propagação no Espaço Livre.....	6
2.2.2 Reflexão.....	7
2.3 Métodos Clássicos de Predição de Perda de Percurso [YAC93], [RAP96].....	10
2.3.1 Okumura-Hata.....	10
2.3.2 Modelo de Lee.....	12
2.4 O Canal Rádio-Móvel.....	13
2.4.1 DISTRIBUIÇÃO DE RAYLEIGH.....	14
2.4.2 DISTRIBUIÇÃO DE RICE.....	15
2.4.3 Distribuição Lognormal.....	16
2.5 CONCLUSÃO.....	19
3 MODELAGEM TEÓRICA DA DIFRAÇÃO MÚLTIPLA.....	20
3.1 O MODELO DE VOGLER.....	22
3.2 O modelo de Walfisch e Bertoni.....	26
3.2.1 Premissas de modelagem.....	26
3.2.2 Outras Simplificações.....	28
3.3 O Modelo de Xia e Bertoni.....	30
3.4 CONCLUSÃO.....	33
4 MÉTODOS DE PREDIÇÃO DE PERDA DE PERCURSO.....	34
4.1 Método Walfisch-Bertoni.....	36
4.2 O Método MBX.....	37
4.2.1 Antena transmissora acima dos edifícios.....	38
4.2.2 Antena transmissora no mesmo nível dos edifícios.....	38
4.2.3 Antena transmissora abaixo dos edifícios.....	39
4.3 Método Xia.....	40
4.3.1 Antena transmissora acima dos edifícios.....	40
4.3.2 Antena transmissora na mesma linha dos edifícios.....	41
4.3.3 Antena transmissora abaixo do edifícios.....	41
4.4 Método COST-231.....	41
4.4.1 Caso Linha de Visada.....	42
4.4.2 Caso Obstruído.....	42
4.5 CONCLUSÕES.....	44
5 CONDIÇÕES DE MEDIDA.....	45
5.1 Escolha das estações.....	46
5.2 Equipamento utilizado.....	47
5.3 Determinação do Modelo de Referência.....	48
5.4 Características das regiões medidas.....	49
5.4.1 Medida 1 – Bairro do Cambuí.....	49
5.4.2 Medida 2 – Bairro do Cambuí e Centro.....	49
5.4.3 Medida 3 – Bairro do Proença e Estádios.....	49

5.4.4	Medida 4 - Centro.....	49
5.4.5	Medida 5 – Bairro do Bonfim	49
5.5	Dados Obtidos.....	49
5.6	CONCLUSÕES	51
6	CÁLCULO DE PARÂMETROS ESTATÍSTICOS	52
6.1	CONCLUSÃO	54
7	ANÁLISE DOS MÉTODOS APRESENTADOS	56
7.1	INTRODUÇÃO	57
7.2	IMPLEMENTAÇÃO DOS MODELOS.....	57
7.3	PARÂMETROS UTILIZADOS	57
7.4	RESULTADOS OBTIDOS	58
7.5	CONCLUSÃO	59
7.5.1	Método Walfisch-Bertoni.....	59
7.5.2	Método Xia	60
7.5.3	Método MBX	60
7.5.4	Método COST-231	60
8	CONCLUSÃO.....	71
8.1	CONTRIBUIÇÕES.....	72
8.2	FATORES INTRODUTORES DE ERRO	73
8.3	SUGESTÃO PARA FUTUROS TRABALHOS.....	73
	BIBLIOGRAFIA.....	74
	APÊNDICE – MAPAS DAS MEDIDAS	76



UNICAMP
INTRODUÇÃO

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

1 INTRODUÇÃO



A história do século XX pode, sob muitos aspectos, ser contada pela história do desenvolvimento tecnológico nele ocorrido e pela mudança do modo de vida da humanidade, causada por esse desenvolvimento. O ritmo e a profundidade das mudanças ocorridas neste século fizeram com que, diferentemente de todas as outras épocas, o *modus vivendi* de uma geração fosse completamente diferente da anterior.

Podemos afirmar com certeza que o domínio das técnicas e fundamentos teóricos básicos da geração, modulação e transmissão de ondas eletromagnéticas foi um dos agentes mais importantes das transformações ocorridas nos últimos cem anos, brindando a humanidade com o rádio em suas mais variadas formas de aplicação, incluindo-se aí o rádio móvel, que será doravante objeto de nosso foco.

Entretanto, quando em 1897, Guglielmo Marconi [Rap96], demonstrou ser possível a comunicação telegráfica sem fios com navios que navegavam pelo Canal da Mancha e, ainda que inconscientemente, inaugurando a era do rádio móvel, talvez não imaginasse que dava o primeiro passo para uma das mais extraordinárias e importantes modificações de hábitos em todo o planeta, cujos reflexos e desdobramentos assistimos hoje com a explosão da utilização dos telefones celulares.

Durante todo este século, o rádio móvel esteve presente e em crescente escala na vida cotidiana das cidades, primeiro com os serviços de rádio-comunicação para navios e barcos, passando então para serviços policiais como rádio patrulha e bombeiros, e posteriormente os sistemas de telefonia móvel comerciais na década de 70, até chegar ao primeiro sistema de telefonia móvel celular implantado em 1983 em Chicago.

Desde então, este tipo de serviço vem se popularizando a cada dia, e estima-se que até o final deste ano de 2000 o Serviço Móvel Celular, incluindo-se aí os serviços chamados PCS/PCN, tenha atingido o número de 450 milhões de



assinantes no mundo¹. Esta marca foi somente possível com o advento das técnicas digitais de acesso múltiplo, que vieram a multiplicar a capacidade dos sistemas celulares através do melhor aproveitamento do espectro disponível, e à liberação de novas licenças, para faixas de operação em torno de 1.8 ou 1.9 GHz. Mantida a atual taxa de crescimento, espera-se que o número de terminais móveis supere o número de terminais fixos nos próximos anos, principalmente com o aumento da oferta de serviços de transmissão de dados sem fio.

Com isto fica bastante clara a necessidade e justificado o grande esforço que vem sendo feito desde então no sentido de compreender melhor os mecanismos e os fenômenos que tomam parte na propagação dos sinais de rádio e modelar satisfatoriamente esta propagação criando ferramentas matemáticas que viabilizem o projeto adequado das redes que vão prover à população este tipo de serviço.

Esta preocupação se torna mais acentuada ainda à medida que, como já dissemos anteriormente, aumenta a frequência de trabalho do sistemas celulares, que hoje situa-se na faixa de 800 MHz a 2,5 GHz, e aumenta também a densidade de células em ambientes urbanos ou suburbanos. Nessas condições, os modelos e métodos de propagação de cobertura desenvolvidos em sua maior parte na década de 70 nem sempre são confiáveis e a necessidade da aplicação de novos modelos e métodos se faz cada vez mais presente.

1.1 OBJETIVOS

É nessa tônica que se enquadra o presente trabalho. Seu objetivo é contribuir com este estudo através da análise comparativa de uma série de modelos de propagação para ambientes urbanos e suburbanos que se baseiam na difração múltipla como fenômeno dominante, bem como alguns métodos propostos para predição da perda de percurso fundamentados nestes modelos.

¹ Fonte: The Stretegis Group, Inc, World Cellular and PCS Markets 1999



Objetivamos também confrontar estas modelagens propostas com medidas de campo, verificando assim a sua aplicabilidade em situações reais.

1.2 ESTRUTURA

Neste primeiro capítulo apresentamos uma introdução contendo a motivação inicial do trabalho, seus objetivos e sua estrutura. No segundo capítulo, descrevemos alguns conceitos fundamentais sobre telefonia móvel celular, rádio propagação e abordagem estatística do canal rádio móvel, necessários para uma melhor compreensão do restante do trabalho. No terceiro capítulo nos ocupamos da modelagem da atenuação por difração múltipla, fenômeno fundamental na propagação dos sinais de rádio em ambientes urbanos, descrevendo o modelo desenvolvido por Vogler, o desenvolvido por Walfisch-Bertoni e ainda aquele desenvolvido por Xia e Bertoni. No quarto capítulo, apresentamos alguns métodos de cálculo de perda de percurso que fazem uso dos modelos apresentados. No quinto capítulo apresentamos medidas realizadas na cidade de Campinas como o objetivo de auxiliar na validação e análise destes métodos. Apresentamos as condições em que foram realizadas estas medidas e apontamos algumas características topográfico-morfológicas das áreas em que foram realizadas. No sexto capítulo, apresentamos uma breve análise estatística dos dados coletados, para uma melhor caracterização dos ambientes em questão. No sétimo capítulo, mostramos as predições com os diversos métodos apresentados em comparação com os dados medidos. O oitavo capítulo traz a conclusão do trabalho.

O foco do presente trabalho são os sistemas de telefonia móvel celular e portanto todas as menções à rádio móvel e telefonia móvel são referentes a este tipo de sistema, salvo quando mencionado o contrário.



UNICAMP

CONCEITOS FUNDAMENTAIS

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS



2.1 O CONCEITO CELULAR

Nas décadas de 50 e 60, pesquisadores do mundo inteiro trabalhavam no desenvolvimento dos conceitos e técnicas de rádio-telefonia celular[Rap96], que possibilitaria solucionar os problemas de capacidade e cobertura enfrentados pelo sistema de telefonia móvel convencional existente. O conceito celular se baseia na divisão da área a ser atendida em pequenas porções geográficas ou células, cada uma delas utilizando uma fração do espectro alocado para o serviço.

O pequeno raio de cobertura de cada célula garante que essas frações, ou grupos de frequência, possam ser reusados constantemente mantendo níveis de interferência controlados e garantindo assim ao sistema capacidade e cobertura suficiente para atender à demanda especificada.

2.2 FENÔMENOS QUE INFLUENCIAM A RÁDIO-PROPAGAÇÃO

Muito embora o conjunto dos mecanismos que tomam parte na propagação de uma onda de rádio por um meio qualquer sejam bastante diversos e complexos, podemos, simplificarmente, tentar descrevê-los através de um dos fenômenos físicos que seguem.

2.2.1 PROPAGAÇÃO NO ESPAÇO LIVRE

Quando existe uma linha de visada completamente desobstruída entre o transmissor e o receptor, a propagação pelo espaço livre será o fenômeno dominante e a relação entre a potência radiada e a potência recebida, portanto a perda de percurso, pode ser obtida utilizando-se a fórmula de Friis. Para antenas isotrópicas, a perda de percurso L em decibéis é dada por [Yac93]:

$$L = 20 \log f + 20 \log R + 32.44 \quad dB \qquad 2-1$$

com a frequência f em megahertz e a distancia R em quilômetros.



2.2.2 REFLEXÃO

Quando uma onda eletromagnética atinge a interface entre dois meios de propriedades elétricas diferentes, parte da sua energia é refletida de volta para o primeiro meio. As características elétricas dos dois meios vão determinar a amplitude e a fase da onda refletida, que será vetorialmente adicionada àquela na direção de propagação original para se obter o campo total no primeiro meio.

2.2.2.1 REFLEXÃO NO SOLO

No ambiente rádio-móvel, mesmo quando existe a linha de visada entre transmissor e receptor, a reflexão no solo se mostra importante e a sua consideração leva à elaboração do chamado modelo dos dois raios, onde o sinal do caminho direto é adicionado vetorialmente ao sinal refletido do solo para se obter o sinal recebido total.

A perda de percurso segundo o modelo dos dois raios pode ser expressa como [Rap96]:

$$L = 40 \log d - (10 \log G_t + 10 \log G_r + 20 \log h_t + 20 \log h_r) \quad 2-2$$

onde G_t é o ganho da antena transmissora, G_r o ganho da antena receptora, h_t a altura em que está colocada a antena transmissora e h_r a altura em que está colocada a antena receptora.

Tal modelo se mostrou razoavelmente preciso para distâncias acima de algumas dezenas de quilômetros com o transmissor acima de 50 m. [Feu94]

2.2.2.2 DIFRAÇÃO [RAP96]

A difração pode ser definida como o fenômeno responsável pela propagação das ondas eletromagnéticas para além do horizonte através da superfície curvada da Terra ou outras obstruções.



2.2.2.3 PRINCÍPIO DE HUYGENS

A difração pode ser entendida e analisada com o auxílio do Princípio de Huygens², que afirma que cada ponto numa frente de onda primária pode ser considerado como uma nova fonte de ondas esféricas secundárias e que a própria frente de onda secundária pode ser construída pela envoltória dessas ondas secundárias.

2.2.2.4 ZONA DE FRESNEL

Zonas de Fresnel são as regiões do espaço, ou os *loci* em que as frentes de ondas secundárias percorrem um caminho que é $n\lambda/2$ adicional ao caminho em linha direta. Estas regiões têm a propriedade de interferir construtiva ou destrutivamente no sinal recebido total. No ambiente rádio-móvel, a perda por difração ocorre pela obstrução de uma ou mais zonas de Fresnel, uma vez que o sinal total é dado pela soma vetorial das ondas primárias e secundárias. Frequentemente esta obstrução é mencionada em relação aos elipsóides de Fresnel, que são formados pelas regiões ou zonas de Fresnel ao longo do percurso entre o transmissor e o receptor, conforme ilustra a Figura 2-1.

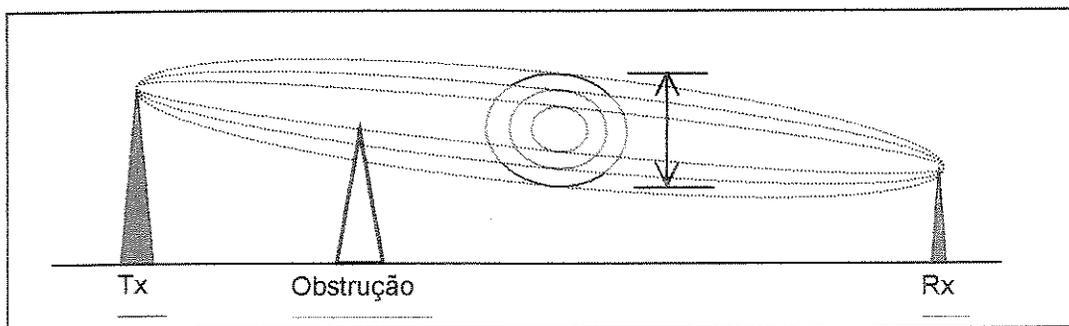


Figura 2-1 – Elipsóide de Fresnel

2.2.2.5 MODELO DE DIFRAÇÃO POR GUME DE FACA [RAP96]

Para o cálculo da perda causada por alguma obstrução bloqueando o caminho entre transmissor e receptor, recorre-se ao modelo de difração por gume de

² C. Huygens, *Traité de la Lumière*, Leyden, 1690



faca. Este é o modelo de difração mais simples e pode fornecer um bom ponto de partida para o estudo deste tipo de perda. Nele, a perda por difração L é obtida através das equações de Fresnel F , como descritas a seguir.

$$L = 20 \log F \quad 2-3$$

onde

$$F = \frac{S(x) + 0.5}{\sqrt{2} \cdot \text{sen} \left(\Delta\varphi + \frac{\pi}{4} \right)} \quad 2-4$$

com

$$\Delta\varphi = \tan^{-1} \left[\frac{S(x) + 0.5}{C(x) + 0.5} \right] - \frac{\pi}{4} \quad 2-5$$

Os termos $C(x)$ e $S(x)$ são as integrais de Fresnel dadas por:

$$C(x) = \int_0^x \cos \left(\frac{\pi}{2} u^2 \right) du \quad 2-6$$

$$S(x) = \int_0^x \sin \left(\frac{\pi}{2} u^2 \right) du \quad 2-7$$

2.2.2.6 DIFRAÇÃO MÚLTIPLA

Na prática, freqüentemente o caminho entre o transmissor e o receptor é bloqueado por mais de uma obstrução. Devido à complexidade da análise da difração envolvida nesses casos, alguns modelos aproximados foram desenvolvidos.

- **Modelo de Bullington**



O modelo de Bullington procura substituir N obstruções por uma equivalente única.

Este modelo foi desenvolvido originalmente para o caso de duas obstruções e por isso sua performance é melhor nesse caso, piorando na medida que N aumenta.

- **Modelo de Epstein-Petterson**

O modelo de Epstein-Peterson considera a perda total como a soma das perdas individuais em cada obstrução, aplicando sucessivamente o modelo de gume de faca

- **Modelo de Deygout**

Este modelo procura determinar uma obstrução dominante e calcular as outras perdas em função dela.

Outros modelos procuram caracterizar o fenômeno da difração múltipla. Nos próximos capítulos apresentaremos em detalhes alguns desses modelos que se propõe a descrever a perda de propagação em ambientes onde a difração múltipla é o fenômeno dominante.

2.3 MÉTODOS CLÁSSICOS DE PREDIÇÃO DE PERDA DE PERCURSO [YAC93], [RAP96]

2.3.1 OKUMURA-HATA

No final da década de 60, Okumura [Oku68] realizou extensivas medições de campo na área de Tóquio para sinais na faixa de UHF.

O modelo proposto por ele consiste de uma estimativa inicial da perda de percurso para um terreno quase plano, sobre a qual são aplicadas alguns fatores de correção.

A estimativa inicial se baseia em curvas empíricas relacionando frequência e distância $A_{OK}(f,d)$ para transmissor e receptor colocados em alturas padrão.



Sobre esta estimativa inicial são aplicados fatores de correção relativos ao ganho de área G_{area} , dependente do tipo de terreno onde o enlace se situa, ganho pela antena de transmissão G_t de 6 dB por oitava e ganho pela antena de recepção G_r de 3 ou 6 dB por oitava conforme a altura do mesmo.

Muito embora simples e de fácil aplicação, o modelo de Okumura não é facilmente implementado computacionalmente.

Baseado nas curvas de Okumura, Hata [Hata90] desenvolveu uma fórmula empírica cujos resultados foram quase idênticos aos obtidos com o modelo de Okumura, respeitadas as faixas de frequência e distância às quais ela se aplica.

Pela fórmula de Hata, a perda de percurso L é dada por:

$$L = 69.55 + 26.16 \log f - 13.82 \log h_t - C_H(h_r) + (44.9 - 6.55 \log h_t) \cdot \log R \quad \text{dB} \quad 2-8$$

com a frequência central do transmissor f dada em megahertz, as alturas h_t e h_r do transmissor e receptor dadas em metros e a distância entre o transmissor e o receptor R dada em quilômetros.

Tal expressão é válida para as seguintes faixas de valores:

$$150 \text{MHz} \leq f \leq 1500 \text{MHz}$$

$$30 \text{m} \leq h_t \leq 300 \text{m}$$

$$1 \text{km} \leq R \leq 20 \text{km}$$

O fator de correção $C_H(h_r)$ é calculado da seguinte forma:

- **Para cidades médias e pequenas:**

$$C_H(h_r) = (1.1 \log f - 0.7) h_r - (1.56 \log f - 0.8) \text{dB} \quad 2-9$$

com $1 \text{m} \leq h_r \leq 10 \text{m}$

- **Para cidades grandes:**

$$C_H(h_r) = 8.29 \log^2(1.54 h_r) - 1.1 \text{dB} \quad (f \leq 200 \text{MHz}) \quad 2-10$$



ou

$$C_H(h_r) = 3.2 \log^2(11.75h_r) - 4.97 \text{ dB} \quad (f \geq 400 \text{ MHz}) \quad 2-11$$

2.3.2 MODELO DE LEE

O modelo proposto por Lee [Lee85] parte do pressuposto bem conhecido de que a razão entre as potências recebidas a duas distâncias diferentes do transmissor é proporcional à razão entre estas distâncias.

Desta forma, para caracterizar a propagação em um determinado ambiente, o modelo precisa fazer uso apenas da potência recebida a uma distância padrão (convencionada em 1 milha) e o coeficiente angular da reta de perda de percurso, sendo estes dois parâmetros facilmente obtidos de dados experimentais ou da literatura.

Uma série de fatores de correção deve ser aplicado para que o modelo possa ser usado em condições diferentes das condições em que foram obtidos os parâmetros. Estes fatores corrigem basicamente os ganhos da antena transmissora e receptora assim como as diferenças de altura.

O modelo até aqui descrito é conhecido como *área-a-área* pelo fato de não levar em consideração a influência da difração e da reflexão. Para incorporar esses fatores, um modelo mais aperfeiçoado chamado *ponto-a-ponto*, foi desenvolvido.

A perda de percurso completa L a uma distância R é dada por:

$$L = L_b + 10 \cdot n \cdot \log\left(\frac{R}{R_b}\right) - C_L + p \cdot (oL_k - \bar{o}L_r) \quad 2-12$$

sendo que a perda total L , a perda básica L_b a uma distância R_b , a perda por difração L_k e a perda por reflexão L_r são expressas em decibéis. O parâmetro p , binário, sinaliza o modo *área-a-área* quando $p=0$ ou o modo *ponto-a-ponto*, quando $p=1$ e o parâmetro o , também binário, indica um percurso obstruído ($o=1$) ou não-obstruído ($o=0$).



O fator de correção C_L é expresso como:

$$C_L = 10 \log \left[\left(\frac{h_t}{h_{tb}} \right)^2 \left(\frac{h_r}{h_{rb}} \right)^x \left(\frac{G_t}{G_{tb}} \right) \left(\frac{G_r}{G_{rb}} \right) \right] \quad 2-13$$

sendo h_t e h_r as alturas das antenas de transmissão e recepção, G_t e G_r os ganhos dessas mesmas antenas e $h_{tb}, h_{rb}, G_{tb}, G_{rb}$ são os valores básicos ou de condições iniciais respectivamente da altura da antena transmissora, altura da antena receptora, ganho da antena transmissora e ganho da antena receptora.

2.4 O CANAL RÁDIO-MÓVEL

A caracterização do canal por onde ocorre a transmissão é uma tarefa bastante complexa, dado o grande número de fatores que afetam a propagação através dele. A distância entre o transmissor e o receptor, o relevo do terreno, a morfologia do uso do solo, a velocidade do móvel e até mesmo a quantidade e o tipo das árvores presentes no percurso entre o transmissor e o receptor influenciam na intensidade do sinal que é recebido.

Por estas razões, um tratamento determinístico é praticamente impossível de ser aplicado e opta-se pelo tratamento estatístico do problema. O nível de sinal recebido é então modelado como uma variável aleatória para a qual densidades de probabilidade apropriadas se aplicam.

Observa-se que o nível de sinal instantâneo sofre perturbações muito rápidas e de grande intensidade, causadas pelo efeito de multi-percurso. A distribuição deste nível instantâneo pode ser modelada através da distribuição de Rayleigh para sinais espalhados, ou de Rice, caso além dos sinais espalhados exista também linha de visada entre o transmissor e o receptor.

Já a média local deste nível de sinal instantâneo, pode ser modelada através de uma distribuição log-normal, ou seja, uma distribuição normal quando as grandezas são logarítmicas.



2.4.1 DISTRIBUIÇÃO DE RAYLEIGH

A distribuição de Rayleigh, como foi dito, se aplica à modelagem do fenômeno da propagação multipercurso, no qual uma onda de rádio, em seu caminho do transmissor ao receptor, é espalhada por obstáculos aleatoriamente distribuídos por este percurso. A cada obstáculo, uma nova frente de onda é gerada, com uma atenuação e um desvio de fase em relação ao campo original.

Ao chegar ao seu destino, o receptor, o sinal resultante será o somatório dos i sinais componentes espalhados pelos obstáculos ao longo do percurso

Pode-se mostrar que o sinal resultante s_r terá um módulo r e uma fase θ na forma:

$$s_r = r \exp[j(\omega_0 t + \theta)] \quad 2-14$$

onde ω_0 é a velocidade angular do sinal e:

$$r \exp(j\theta) = x + jy \quad 2-15$$

quando por definição:

$$x = \sum_{i=1}^n a_i \cos \theta_i \quad 2-16$$

e

$$y = \sum_{i=1}^n a_i \sin \theta_i \quad 2-17$$

onde a_i e θ_i são a amplitude e a fase do i -ésimo componente espalhado do sinal

Uma vez que a_i é aleatório e θ_i possui distribuição uniforme e ainda o valor de n é elevado, pode-se invocar o Teorema do Limite Central para afirmar que tanto x como y seguem uma distribuição normal de médias zero e variâncias, por definição

$$\sigma_x^2 = \sigma_y^2 = \sigma_r^2 \quad 2-18$$



A distribuição conjunta de x e y é dada por

$$p(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_r^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma_r^2}\right) \quad 2-19$$

que pode ser transformada em:

$$p(r, \theta) = \frac{1}{2\pi\sigma_r^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_r^2}\right) \quad 2-20$$

para se obter apenas a função densidade de probabilidade (fdp). de r , basta integrar esta expressão em toda a faixa de variação de θ , portanto:

$$p(r) = \int_0^{2\pi} p(r, \theta) d\theta = \begin{cases} \frac{r}{\sigma_r^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_r^2}\right) & r \geq 0 \\ 0 & \text{caso contrario} \end{cases} \quad 2-21$$

é a função densidade de probabilidade de Rayleigh.

2.4.2 DISTRIBUIÇÃO DE RICE

Quando existe uma linha de visada entre transmissor e receptor, obviamente um percurso dominante se sobreporá ao sinal espalhado. Podemos descrever o sinal recebido como:

$$s_r = r \exp(j\omega_0 t + \theta) + a \exp(j\omega_0 t) \quad 2-22$$

sendo r e θ , respectivamente, o módulo e a fase do sinal espalhado e a a intensidade do sinal que chega ao receptor pelo caminho direto. O primeiro termo, portanto, é responsável pelo sinal espalhado e o segundo pelo campo direto.

Da mesma forma que no caso anterior, definimos:

$$x = \sum_{i=1}^n a_i \cos \theta_i \quad 2-23$$



e

$$y = \sum_{i=1}^n a_i \text{sen } \theta_i \quad 2-24$$

com a_i e θ_i sendo a amplitude e a fase do i -ésimo componente espalhado e definindo ainda:

$$r^2 = (x+a)^2 + y^2 \quad 2-25$$

$$x+a = r \cos \theta \quad 2-26$$

$$y = r \text{sen } \theta \quad 2-27$$

pode-se expressar a fdp. de r como:

$$p(r) = \frac{r}{\sigma_r^2} \exp\left(-\frac{r^2+a^2}{2\sigma_r^2}\right) I_0\left(\frac{ar}{\sigma_r^2}\right) \quad 2-28$$

sendo

$$I_0(v) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} v \cos \theta d\theta \quad 2-29$$

a função de Bessel modificada de ordem zero[Abs64].

2.4.3 DISTRIBUIÇÃO LOGNORMAL

A distribuição lognormal se aplica à descrição estatística do desvanecimento lento do sinal, ou seja, quando este é obstruído por montanhas, edifícios e outros grandes obstáculos naturais ou artificiais.

Para se chegar à distribuição lognormal, parte-se da solução para as equações de onda representada por:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{\pm \gamma r} \quad 2-30$$



sendo E_0 a amplitude do campo elétrico, r a direção da propagação e γ a constante vetorial de propagação dada por:

$$\gamma = \sqrt{(\sigma + j\omega\epsilon) \cdot j\omega\mu} = \alpha + j\beta \quad 2-31$$

onde

$$\alpha^2 = \omega^2 \frac{\mu\epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right)^2} - 1 \right) \quad 2-32$$

$$\beta^2 = \omega^2 \frac{\mu\epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right)^2} + 1 \right) \quad 2-33$$

α e β são chamados constantes de atenuação e constante de fase respectivamente e expressos em unidade de neper por metro, o primeiro e radiano por metro, o último.

Na direção de propagação, o valor absoluto do campo elétrico E é dado por:

$$E = E_0 \exp(-\alpha x) \quad 2-34$$

Considera-se então uma onda de rádio que em seu percurso do transmissor até o receptor viaja por diversos meios. Cada meio i possui sua própria constante de atenuação α_i e espessura Δr_i . A intensidade do campo no meio i , pode ser expressa então em função da intensidade de campo no meio $i-1$ através de:

$$E_i = E_{i-1} \exp(-\alpha_i \Delta r_i) \quad 2-35$$

e por recursividade, o campo após n meios é dado por:

$$E_n = E_0 \exp\left(-\sum_{i=1}^n \alpha_i \Delta r_i\right) \quad 2-36$$

pode-se definir novamente a variável x como:



$$x = -\sum_{i=1}^n \alpha_i \Delta r_i \quad 2-37$$

onde α_i e Δr_i variam aleatoriamente.

Invocando mais uma vez o teorema do limite central, pode-se afirmar que x é uma variável aleatória com distribuição normal, cuja função densidade de probabilidade é dada por:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\eta_x}{\sigma_x}\right)^2\right] \quad 2-38$$

Com isso pode-se proceder a determinação da relação y entre o campo original E_0 e o campo após n percursos E_n , ou seja:

$$y = \frac{E_n}{E_0} = \exp(x) \quad 2-39$$

e também :

$$Y = \log y = x \log e \quad 2-40$$

Igualando-se as áreas sob as curvas de $p(Y)$ e $P(x)$, chega-se a

$$p(Y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Y} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{Y-M_Y}{\sigma_Y}\right)^2\right] \quad 2-41$$

onde

$$M_Y = \log m_y = m_x \log e \quad 2-42$$

e

$$\sigma_Y = \log \sigma_y = \sigma_x \log e \quad 2-43$$

Da mesma forma a o sinal recebido R em decibéis tem densidade de probabilidade lognormal dada por:



$$p(R) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_R} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{R-M_R}{\sigma_R}\right)^2\right]$$

2-44

2.5 CONCLUSÃO

Neste Capítulo, procuramos apresentar o canal rádio-móvel e os fenômenos envolvidos na propagação de um sinal de rádio através dele.

Apesar da complexidade dos processos que tomam parte na propagação de ondas eletromagnéticas através do espaço, é possível caracteriza-los como ação ou efeito conjuntos de fenômenos mais simples e melhor conhecidos como aqueles abordados neste capítulo.

Já tendo em foco a aplicação do canal à Telefonia Móvel Celular, apresentamos também dois dos mais populares métodos empíricos para o cálculo da perda de percurso e por fim a caracterização estatística deste ambiente.



LINICAMP

MODELAGEM TEÓRICA DA DIFRAÇÃO MÚLTIPLA

3 MODELAGEM TEÓRICA DA DIFRAÇÃO MÚLTIPLA



A abordagem tradicional para o cálculo da perda de percurso de sinais de rádio, em especial daqueles dentro da faixa de trabalho do Sistema Móvel Celular (SMC), consiste na utilização de modelos empíricos, fundamentados sobre uma vasta gama de medições realizadas em várias partes do planeta e em diversos tipos de ambiente.

A análise dessas medições levou à conclusão de que existe uma dependência entre a potência e a distância em $1/R^n$, onde n é uma constante dependente de cada ambiente. Portanto, os modelos desenvolvidos para realizar a predição de perda de percurso, geralmente, constituem-se de uma relação entre a média do sinal esperado em função da distância até o transmissor, obtida a partir de uma certa situação padrão. A isto são acrescentados diversos fatores de correção para dar conta das peculiaridades de cada situação como a altura das antenas de transmissão e recepção e características morfológicas e topográficas do terreno.

Desta forma, pouco ou quase nada se conclui sobre a contribuição de cada fenômeno físico na composição do sinal recebido. Tampouco se conhece a influência de fatores como a altura das edificações ou largura das ruas.

Nos ambientes urbanos e suburbanos, em especial em regiões compostas de áreas majoritariamente residenciais e comerciais, tem sido consenso que a propagação dos sinais de rádio se dá, na sua maior parte, através de múltipla difração por sobre os topos dos edifícios.

A seguir, apresentaremos alguns modelos desenvolvidos para descrever tal fenômeno, e no capítulo seguinte mostraremos como os modelos apresentados são utilizados em métodos para o cálculo da perda de percurso total.



3.1 O MODELO DE VOGLER

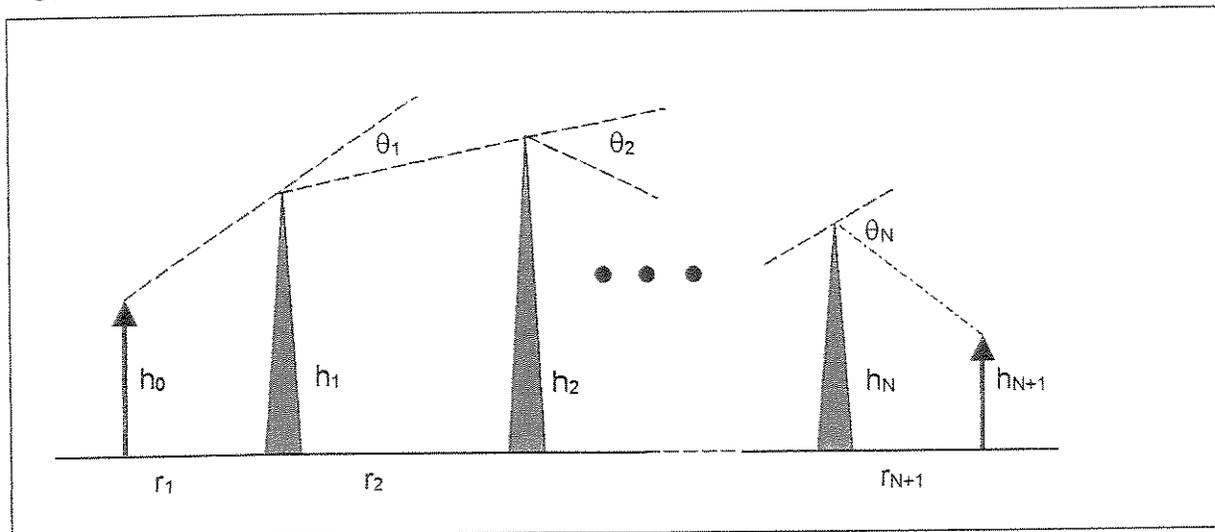


Figura 3-1 – Geometria do Problema

Baseado no trabalho de Furutsu [Fur63], Lewis E. Vogler [Vog81],[Vog82] propôs uma modelagem teórica para o problema da difração múltipla.

Furutsu propôs um modelo generalizado, através de uma série residual, para o problema da propagação das ondas de rádio sobre uma seqüência arbitrária de objetos de contornos suaves e arredondados, como montanhas, por exemplo.

Segundo essa formulação, cada objeto é caracterizado por seu raio de curvatura e suas constantes elétricas, restando ainda caracterizar a onda propagante segundo sua freqüência e forma de polarização.

Vogler sugere que se o raio de curvatura tender a zero então o problema se reduz à propagação através de uma série de obstruções do tipo gume-de-faca (*knife-edges*). Tal redução é interessante pois permite que a série residual para cada obstáculo seja revertida numa integral sobre variáveis contínuas.

O modelo proposto permite então que se calcule a atenuação após a difração sobre uma seqüência qualquer de obstruções deste tipo, desde que sejam conhecidas as suas alturas e o espaçamento entre elas.



A Fig. 3-1 ilustra a geometria associada ao problema. Tal geometria é descrita através dos parâmetros geométricos α e β , sobre os quais Vogler constrói seu modelo, sendo:

$$\alpha_m = \left[\frac{r_m r_{m+2}}{(r_m + r_{m+1}) \cdot (r_{m+1} + r_{m+2})} \right]^{1/2} \quad m = 1, \dots, N-1 \quad 3-1$$

e

$$\beta_m = \theta_m \left[\frac{jkr_m r_{m+1}}{2(r_m + r_{m+1})} \right]^{1/2} \quad m = 1, \dots, N \quad 3-2$$

onde k é o número de onda

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad 3-3$$

Com estes parâmetros definidos, Vogler expressa a atenuação A_v relativa ao espaço livre, sobre um percurso de comprimento total r_T consistindo de N obstruções, como:

$$A_v = \left(\frac{1}{2} \right)^N C_N e^{\sigma_N} \left(\frac{2}{\pi^{1/2}} \right)^N \int_{\beta_1}^{\infty} \dots \int_{\beta_N}^{\infty} e^{f'} \left\{ \exp[-(x_1^2 + \dots + x_N^2)] \right\} dx_1 \dots dx_N \quad 3-4$$

sendo que:

$$f' = 0 \quad \text{quando } N = 0 \quad 3-5$$

e

$$f' = \sum_{m=1}^{N-1} \alpha_m (x_m - \beta_m)(x_{m+1} - \beta_{m+1}) \quad \text{quando } N \geq 2 \quad 3-6$$

$$\sigma_N = \beta_1^2 + \dots + \beta_N^2$$

e também

$$C_N = 1 \quad \text{quando } N = 1 \quad 3-7$$



ou

$$C_N = \left[\frac{r_2 r_3 \cdots r_N r_T}{(r_1 + r_2)(r_2 + r_3) \cdots (r_N + r_{N+1})} \right]^{1/2} \quad \text{se } N \geq 2 \quad 3-8$$

$$r_T = r_1 + r_2 + \cdots + r_{N+1} \quad 3-9$$

A expressão obtida é extremamente complicada para implementação computacional. Para amenizar o problema, Vogler a reduz novamente a uma forma mais adequada ao cálculo computacional.

Para isso lança mão do recurso de representar a expressão da atenuação obtida através de uma série de termos envolvendo a integração repetida da função erro.

Utilizando a notação

$$\left(\frac{2}{\pi^{1/2}} \right) \int_{\beta}^{\infty} (x - \beta)^n e^{-x^2} dx = n! \cdot I(n, \beta) \quad 3-10$$

A função da atenuação fica

$$A_v = \left(\frac{1}{2^N} \right) C_N \sigma^N \sum_{m=0}^{\infty} I_m \quad 3-11$$

onde

$$I_m = 2^m m! \alpha_1^m I(m, \beta_1) I(m, \beta_2) \quad \text{para } N = 2 \quad 3-12$$

ou

$$I_m = 2^m \sum_{m_1=0}^m \cdots \sum_{m_{N-2}=0}^{m_{N-3}} \prod_{i=1}^N \left\{ \frac{(m_{i-1} - m_{i+1})!}{(m_i - m_{i+1})!} \right\} \cdot \alpha_i^{m_{i-1} - m_i} I(n_i, \beta_i) \quad \text{para } N \geq 3 \quad 3-13$$

$$n_i = (m_0 - m_1) \quad i = 1 \quad 3-14$$



$$n_i = (m_{i-2} - m_i) \quad \text{para } 2 \leq i \leq N-1 \quad 3-15$$

$$n_i = (m_{N-2} - m_{N-1}) \quad \text{para } i = N \quad 3-16$$

$$\alpha_N \equiv 1, m_0 \equiv m, m_k \equiv 0 \quad 3-17$$

Segundo Vogler, com isso foi possível reduzir esta expressão inicial a um formato mais adequado.

Isso foi feito, primeiro definindo-se a função:

$$C(N-1, m_{N-2}, m_{N-3}) = (m_{N-3}) \alpha_{N-1}^{m_{N-2}} I_e(m_{N-3}, \beta_{N-1}) I_e(m_{N-2}, \beta_N) \quad 3-18$$

e então, com a notação

$$i = m_{N-L} \quad j = m_{N-L-1} \quad k = m_{N-L-2} \quad 3-19$$

$$2 \leq L \leq N-2 \quad N \geq 4 \quad 3-20$$

e a relação recursiva

$$C(N-L, j, k) = \sum_{i=0}^j \left\{ \frac{(k-i)!}{(j-i)!} \right\} \cdot \alpha_{N-L}^{j-i} I_e(k-i, \beta_{N-L}) \cdot C(N-L+1, i, j) \quad 3-21$$

I_m é dado por:

$$I_m = 2^m \sum_{m_1=0}^{m_0} \alpha_1^{m_0-m_1} I(m_0 - m_1, \beta_1) C(2, m_1, m_0) \quad 3-22$$

com

$$m_0 \equiv m \quad 3-23$$

No seu trabalho, Vogler apresenta alguns resultados interessantes para múltipla difração em até 6 obstruções, pois o cálculo com mais obstruções é demasiado lento para aplicações práticas e não foi realizado.



No presente trabalho, não foi realizada a implementação deste modelo nem com a expressão dita apropriada para a implementação computacional, tampouco com a expressão original, uma vez que a convergência do termo

$$\sum_{m=0}^{\infty} I_m$$

3-24

é bastante crítica.

Gonçalves [Gon97] conseguiu fazer uso do modelo de Vogler em conjunto com outros modelos, mas mesmo assim, apenas para até 4 obstruções. No mesmo trabalho menciona que a convergência da série que envolve a função erro complementar só era possível impondo certas limitações aos valores de β .

Devido às suas dificuldades de implementação, aplicabilidade restrita, problemas de convergência e tempo de implementação, o método de Vogler não foi considerado nas comparações feitas no presente trabalho.

3.2 O MODELO DE WALFISCH E BERTONI.

Uma alternativa a modelagem de Vogler foi proposta por Wafisch e Bertoni [Wal88]. Tal modelo considera uma antena elevada acima da média dos edifícios ao seu redor como sendo a fonte primária do campo que se propaga por sobre o topo dos edifícios.

Para a formulação do modelo, foram adotadas algumas premissas que passamos a apresentar. Tais premissas são, em sua maioria, válidas para os demais modelos que serão apresentados em seguida.

3.2.1 PREMISSAS DE MODELAGEM

3.2.1.1 ORGANIZAÇÃO DAS CIDADES

Como primeira premissa, considera-se que as cidades são formadas por um núcleo de alta densidade urbana e com edifícios altos, e que esses núcleos são



cercados por áreas suburbanas, formadas por grandes e numerosos blocos considerados de formato quadrados.

Nestes blocos, os edifícios de cada lado da rua são adjacentes ou possuem passagens entre si que são menores do que a largura dos próprios edifícios, formando uma seqüência de fileiras.

3.2.1.2 LINHA DE VISADA

Considera-se na modelagem a propagação sem linha de visada, ou seja, que a propagação se dá por entre os edifícios, através deles e por sobre os telhados.

Para os fins dessa modelagem, o sinal é sempre sombreado pelos edifícios. Despreza-se a situação ocasional de ruas alinhadas com o transmissor, ou onde os espaços entre os edifícios se alinham com a antena transmissora.

3.2.1.3 SINAL REFRAATADO

A propagação através dos edifícios sofre perdas por reflexão e refração. O sinal que penetra a fileira de edifícios imediatamente antes da estação móvel pode vir a ser significativa, entretanto os sinais que atravessam várias fileiras de prédios é suficientemente pequeno para ser desprezado e por isso não serão considerados no modelo.

3.2.1.4 PROPAGAÇÃO POR ENTRE OS EDIFÍCIOS.

A propagação por entre os edifícios também é desprezível pelo fato de que as passagens entre os edifícios raramente estão alinhadas, para permitir a propagação.

3.2.1.5 CAMPO REFLETIDO PELO CHÃO

Cada fileira de prédios tem a forma aproximada de um obstáculo cilíndrico e, devido a isto, a propagação por sobre os telhados proporciona que uma parte do sinal seja difratado em direção ao chão.



Uma parte desse campo pode eventualmente ser refletido de volta ao campo primário. Entretanto, como o campo deve se refletir pelo menos duas vezes entre os edifícios antes de voltar à direção original podemos desprezá-lo pela sua pequena influência na média do sinal.

3.2.1.6 CAMPO DIFRATADO DUAS VEZES.

O campo que incide em cada telhado ou topo de edifício é sempre difratado para frente e para trás. O campo refletido para trás duas vezes irá se propagar na direção do campo primário. Entretanto, por duas razões, esse campo também pode ser desprezado. Primeiro por que o campo duas vezes difratado será bastante menor que o campo original e segundo porque essa dupla difração vai implicar uma variação de fase significativa, principalmente devido a irregularidade nos topos dos edifícios. Esta variação de fase faz com que o campo difratado de volta ao campo principal, quando computado ao longo das fileiras de edifício, tenda a se anular em média [Wal88].

3.2.2 OUTRAS SIMPLIFICAÇÕES

Além das premissas adotadas, as seguintes simplificações são também necessárias para viabilizar a modelagem do campo no topo dos edifícios.

- As fileiras de prédios são igualmente espaçadas:

Ao contrário da modelagem de Vogler, agora será necessário que o espaçamento entre as fileiras de prédios seja constante.

- O campo incidente é plano:

O que é se torna mais próximo da realidade conforme aumenta a distância até o transmissor.

- Utilização de semiplanos perfeitamente condutores:



Como os ângulos de incidência são pequenos, o campo difratado tem pouca dependência em relação à secção transversal das obstruções. Somando isso ao fato de que o campo elétrico refletido pelo solo pode ser desprezado, os edifícios podem, para efeito de cálculo, ser substituídos por semiplanos perfeitamente condutores .

- Direção de propagação:

A direção de propagação da onda plana incidente é considerada normal às fileiras de prédios e paralelo ao solo

Utilizando-se as considerações acima expostas, Walfisch e Bertoni adotaram um método baseado na resolução numérica da integral de Kirchoff-Huygens para encontrar o valor do campo difratado por uma série de semiplanos.

Denominando semiplano $n=N$ o N -ésimo semiplano da seqüência, o valor do campo incidente no semiplano $n=0$ é usado para calcular o valor do campo incidindo no semiplano $n=1$ e assim sucessivamente, e, considerando que:

- Não existe variação do campo no eixo z .
- O campo magnético da onda plana incidente tem amplitude unitária.
- A variação temporal é em $\exp(j\omega t)$.

O campo magnético $H_{n+1}(y)$ sobre o n -ésimo semiplano é dado por:

$$H_{n+1}(y) = \frac{e^{j\pi/4}}{2\sqrt{\lambda}} \int_0^{\infty} H_n(y') \frac{e^{-jkr}}{\sqrt{R}} (\cos \delta + \cos \alpha_i) dy' \quad 3-25$$

onde

$$R = \sqrt{d^2 + (y - y')^2} \quad 3-26$$

e

$$\cos \delta = d/R \quad 3-27$$



sendo d a distância entre as fileiras de edifícios e λ o comprimento de onda do sinal propagante.

Para efetuar tal integração foi necessário aproximá-la em intervalos discretos e definir uma estratégia de truncamento.

Os autores demonstraram que, para valores positivos do ângulo de incidência α_i , a amplitude do campo magnético tende a se estabilizar após um certo número de semiplanos. Tal comportamento pode ser melhor entendido observando-se a Figura 3-2. Nela podemos observar que as obstruções penetram na região do elipsóide de Fresnel, introduzindo interferência ora construtiva, ora destrutiva conforme aumenta o número N de fileiras. Após uma certa quantidade N_0 de fileiras, o número de obstáculos na região do elipsóide de Fresnel passa a ser constante, levando a uma estabilização do valor da intensidade de campo.

Para se obter uma aproximação da razão $Q(\alpha_i)$ entre a amplitude estabilizada deste campo e o a amplitude do campo incidente, foram traçados os valores de $Q(\alpha)$, a partir da função $H(y)$ para $N=N_0$ ou e através de regressão, chegou-se à expressão:

$$Q \cong 0.1 \left[\frac{\alpha_i \sqrt{d/\lambda}}{0.03} \right]^{0.9} \quad 3-28$$

para a atenuação provocada pela difração múltipla, onde α_i é o ângulo de incidência e d a distância entre as fileiras.

3.3 O MODELO DE XIA E BERTONI

O trabalho de Walfisch e Bertoni, entretanto possui a limitação de ser capaz de analisar a atenuação no campo eletromagnético apenas para valores positivos de α_i .



Xia e Bertoni[XiB92] ultrapassaram tal limitação ao serem capazes de expressar o valor do campo incidente após uma série de difrações como uma somatória envolvendo um tipo especial de funções recorrentes estudadas por J. Boersma [Boe78] e por isso mesmo denominadas funções de Boersma.

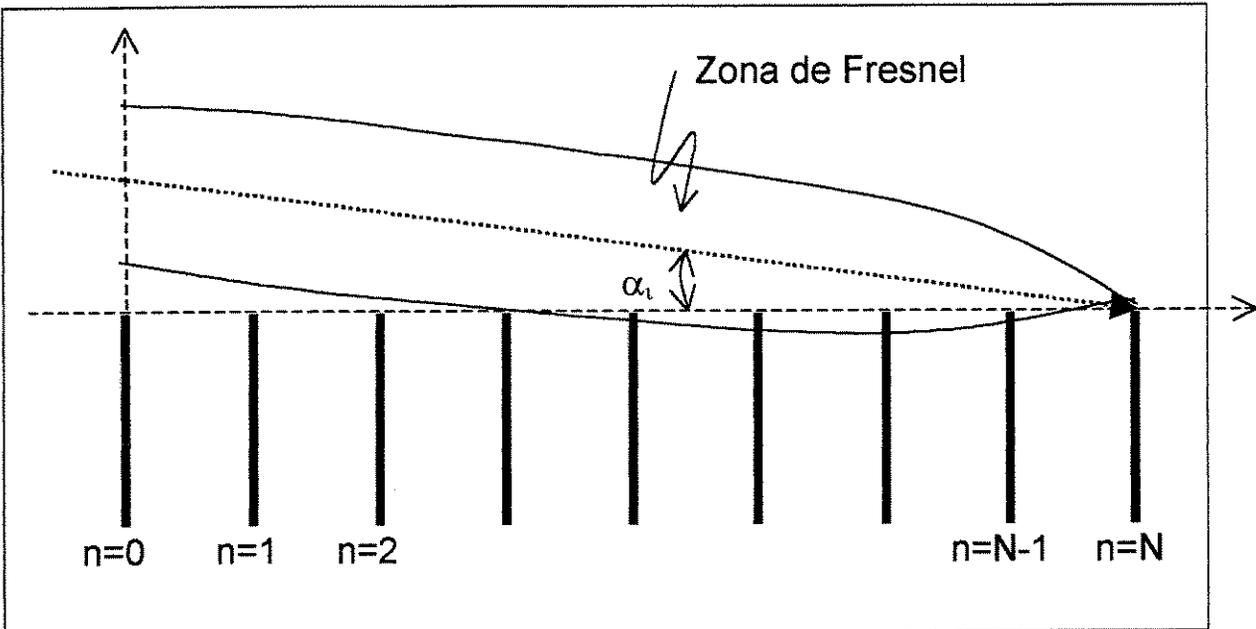


Figura 3-2 – Zona de Fresnel

Para chegar a tal formulação, partiu-se de uma abordagem de Óptica Física do fenômeno. Segundo tal abordagem, a distribuição de corrente magnética equivalente na incidência do n -ésimo semiplano é dada por

$$M_z(y_n) = -\frac{2k}{\omega\epsilon} \cdot \frac{1}{jk} \cdot \frac{\partial H(y_n)}{\partial x} \quad 3-29$$

onde $H(y_n)$ é o campo magnético, mais uma vez orientado ao longo do plano z (perpendicular ao plano do papel, na figura) do n -ésimo semiplano, k é o número de onda, ω a frequência angular e ϵ a permissividade elétrica do meio.

O campo então no plano $n+1$ será dado por

$$H(y_{n+1}) = j\omega\epsilon \int_0^\infty M_z(y_n) G(R) dy_n \quad 3-30$$



onde $G(r)$ é a função de Green bidimensional que pode ser aproximada por

$$G(R) \approx \frac{j}{4} \sqrt{\frac{2}{\pi k R}} e^{jkR - j\frac{\pi}{4}} \quad 3-31$$

e

$$R = \sqrt{d^2 + (y_{n+1} - y_n)^2} \approx d^2 + \frac{(y_{n+1} - y_n)^2}{2d} \quad 3-32$$

O resultado final é a expressão do campo magnético através das funções de Boersma

$$H(y_{N+1}) = H_{N+1} = e^{jkNd} \sum_{q=0}^{\infty} \frac{[2\sqrt{-j\pi}g_p]^q}{q!} I_{b_{N,q}}(1)$$

3-33

Tais funções obedecem às seguintes relações de recursão

$$I_{N,q} = \frac{N(q-1)}{2(N+1)} I_{N,q-2} + \frac{1}{2\pi^{1/2}(N+1)} \sum_{n=1}^{N-1} \frac{I_{n,q-1}}{(N-n)^{1/2}} \quad 3-34$$

$$I_{N,0} = \frac{(1/2)_N}{N!} \quad 3-35$$

$$I_{N,1} = \frac{1}{2\pi^{1/2}} \sum_{n=0}^{N-1} \frac{(1/2)_n}{n^{3/2}(N-n)^{1/2}} \quad 3-36$$

Para obter a expressão aproximada da atenuação $Q(\cdot)$ após N semiplanos, as mesmas propriedades de estabilização observadas por Walfisch e Bertoni se aplicam aqui e mostra-se que

$$\sqrt{kr_{N+1}} |H_{N+1}| \approx Q(g_p) \quad 3-37$$

quando



$$g_p = \alpha_i \sqrt{\frac{d}{\lambda}} \quad 3-38$$

sendo α_i o ângulo de incidência, d a distância entre dois semi-planos e λ o comprimento de onda.

3.4 CONCLUSÃO

Neste capítulo foram apresentados alguns modelos para a propagação de campos eletromagnéticos baseados na difração múltipla, fenômeno predominante quando esta propagação se dá em ambientes urbanos e suburbanos. Estes modelos são a base para os métodos de cálculo de perda de percurso que serão apresentados no Capítulo 4. Por sua complexidade, aplicabilidade restrita e dificuldade de implementação, o modelo de Vogler não será incluído no restante deste trabalho.

A aplicabilidade das premissas de modelagem utilizadas à realidade do ambiente encontrado nas cidades brasileiras é um tema bastante interessante especialmente em dois pontos. O primeiro diz respeito à organização das cidades. A não existência, na maior parte dos casos, de um planejamento urbano tão rígido faz com que a estrutura das nossas cidades seja substancialmente diferente da estrutura de grade utilizada na modelagem.

O segundo ponto diz respeito à consideração exclusiva do campo difratado primário, desprezando a influência de sinais secundários que chegam ao móvel. Esta consideração está intrinsecamente ligada à premissa de organização "matricial" da cidade e é válida na mesma medida que a primeira. Acreditamos que a comparação com medidas de campo, que será apresentada no Capítulo 7, possa trazer uma melhor compreensão da aplicabilidade de tais premissas à realidade de grandes cidades não planejadas como é o caso de Campinas.



UNICAMP

MÉTODOS DE PREDIÇÃO DE PERDA DE PERCURSO

4 MÉTODOS DE PREDIÇÃO DE PERDA DE PERCURSO



A modelagem proposta no capítulo anterior trata apenas da atenuação produzida pela difração múltipla.

Para obter um modelo completo da perda de percurso, é preciso considerar alguns fatores adicionais.

Podemos subdividir a perda de percurso total em três principais componentes, quais sejam, a perda por propagação no espaço livre L_{FS} , a perda por difração múltipla L_{MD} analisada no capítulo anterior e ainda um terceiro componente que procura modelar a propagação do sinal desde o topo do último edifício até o nível da rua onde se encontra o receptor. Este último termo será denominado L_{RTS} .

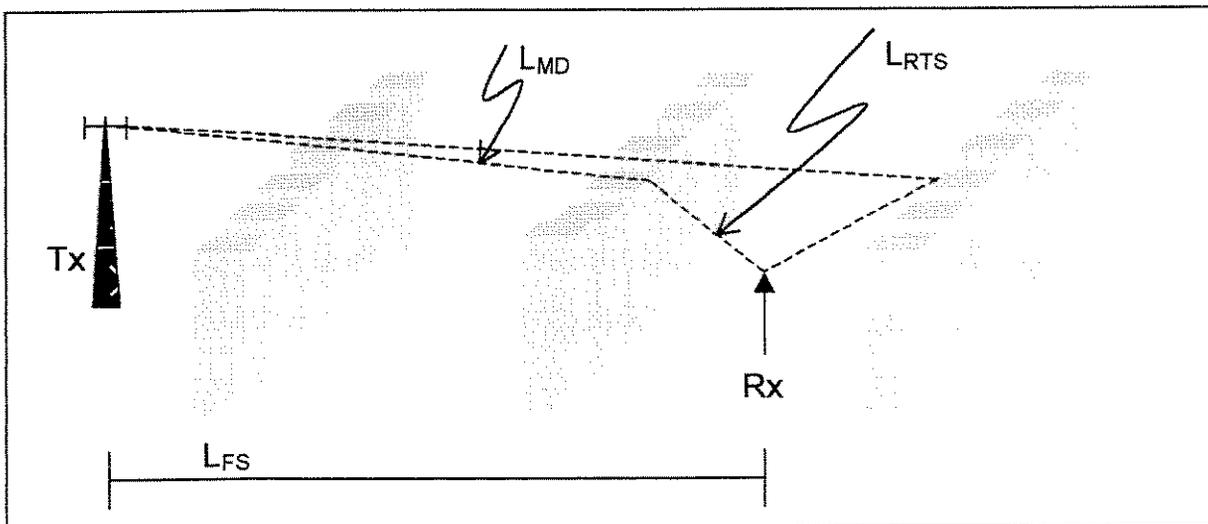


Figura 4-1 – Componentes da Perda de Percurso

Assim, a perda de percurso será:

$$L = L_{FS} + L_{MD} + L_{RTS} \quad 4-1$$

Nas seções a seguir apresentamos alguns dos métodos para o cálculo da perda de percurso propostos utilizando as expressões apresentadas no Capítulo anterior combinadas com diversas formas para o cálculo de L_{RTS} .



4.1 MÉTODO WALFISCH-BERTONI

Com base na expressão obtida em (3-29), Walfisch e Bertoni propuseram ainda um modelo de perda de percurso.

Tal modelo leva em conta a perda por múltipla difração definida em (3-29) com α_i dado por

$$\alpha_i = \frac{H}{R} - \frac{R}{2R_e} \quad 4-2$$

onde H é a altura do Transmissor e R_e o raio de curvatura da Terra, e também um componente associado com a difração do topo do último edifício até o receptor, no nível da rua.

Essa expressão é dada por

$$L_{RTS} = \frac{\sqrt{\lambda}}{2\pi} \frac{1}{\left[\left(\frac{d}{2}\right)^2 + (h_b - h_r)^2\right]^{1/4}} \left[\frac{-1}{\gamma - \alpha_i} + \frac{1}{2\pi + \gamma - \alpha_i} \right] \quad 4-3$$

onde

$$\gamma = \tan^{-1} \left[\frac{2(h_b - h_r)}{d} \right] \quad 4-4$$

sendo h_b a altura média dos edifícios e h_r a altura da antena do receptor.

Somadas estas componentes, a expressão resulta:

$$L = 57.1 + A_{wb} + \text{Log } f_c + 18\text{Log } R - 18\text{Log } h_b - 18\text{Log} \left[1 - \frac{R^2}{17h_b} \right] \quad 4-5$$

onde



$$A_{wb} = 5\text{Log}\left[\left(\frac{d}{2}\right)^2 + (h_b - h_m)^2\right] - 9\text{Log}d + 20\text{Log}\left\{\tan^{-1}\left[2\left(\frac{h_b - h_r}{d}\right)\right]\right\} \quad 4-6$$

com a altura dos edifícios h_b em metros, a distância entre Transmissor e Receptor R em quilômetros, a distância entre os edifícios d em metros e os ângulos em radianos.

Para obter a perda total, é preciso adicionar ainda a perda por propagação no espaço livre conforme (2.1).

Segundo os autores, esta expressão apresentou razoável concordância com medições feitas na Filadélfia por Ott e Plitkins [OtP78], entretanto estas medições apresentam poucos pontos para distâncias inferiores a 1,5 km, o que não nos permite uma avaliação mais precisa do comportamento do modelo em sistemas de características mais acentuadamente microcelulares.

Os autores mostram ainda uma sensível concordância entre o modelo apresentado e o modelo desenvolvido por Okumura [Oku68] e apresentado no item 2.3.1

4.2 O MÉTODO MBX

Maciel, Bertoni e Xia [Mbx93] formularam uma abordagem unificada, a partir das abordagens anteriores que, pelo menos em teoria seria aplicável a quaisquer faixas de altura de antena da estação rádio base em relação a altura média dos edifícios.

Por esta abordagem, a perda de propagação pode, mais uma vez, ser subdividida nas três partes apresentadas.

Na composição do modelo é usada a perda no espaço livre dada por (2.1) e a perda por difração do topo do último edifício até o móvel dada por:

$$L_{RTS} = -10\log\left[\frac{\lambda}{2\pi^2 R_{RTS}} \left(\frac{1}{\theta_i} - \frac{1}{2\pi + \theta_i}\right)^2\right] \quad 4-7$$



obtida a partir da Teoria Geométrica da Difração [Mbx93].

onde

$$\theta_i = \tan^{-1} \left(\frac{h_B - h_m}{w} \right) \quad 4-8$$

e

$$R_{RTS} = \sqrt{(h_B - h_r)^2 + w^2} \quad 4-9$$

A última parcela é a perda por difração múltipla e três casos são apresentados:

4.2.1 ANTENA TRANSMISSORA ACIMA DOS EDIFÍCIOS

No caso de antenas acima da altura média dos edifício, é utilizada uma das expressões obtida por Walfisch e Bertoni e que proporciona uma precisão de cerca de 0.8 dB na faixa $0.01 < g_p < 0.4$

$$Q(g_p) = 2.35g_p^{0.9} \quad 4-10$$

e uma outra regressão polinomial, que proporciona uma precisão superior a 0.5 dB na faixa $0.01 < g_p < 1$

$$Q(g_p) = 3.502g_p - 3.327g_p^2 + 0.962g_p^3 \quad 4-11$$

4.2.2 ANTENA TRANSMISSORA NO MESMO NÍVEL DOS EDIFÍCIOS

Para antenas no mesmo nível ou um pouco abaixo do nível médio dos edifícios, utiliza-se uma das expressões obtida por Xia e Bertoni, baseada nas funções de Boersma

$$Q_M = \sqrt{M} \cdot \left| \frac{1}{q!} [2g_c \sqrt{j\pi}]^q I_{b_{M-1,q}} \right| \quad 4-12$$

onde g_c é um parâmetro adimensional válido para ondas cilíndricas e que diz respeito à da geometria do problema.



$$g_c = y_0 \frac{1}{\sqrt{\lambda d}} \quad 4-13$$

e y_0 é a diferença de altura entre a antena da Estação Rádio Base e a altura média dos edifícios.

$$y_0 = H_s - h_B \quad 4-14$$

As funções de Boersma $I_{M-1,q}$ podem ser computadas recursivamente conforme mostrado em 3.3 e aqui reproduzido em função de M para maior facilidade.

$$I_{M-1,q} = \frac{(M-1)(q-1)}{2M} I_{M-1,q-2} + \frac{1}{2\sqrt{\pi M}} \sum_{n=1}^{M-2} \frac{I_{n,q-1}}{(M-1-n)^{1/2}} \quad 4-15$$

$$I_{M-1,0} = \frac{1}{M^{3/2}} \quad 4-16$$

$$I_{M-1,1} = \frac{1}{4\sqrt{\pi}} \sum_{n=1}^{M-1} \frac{1}{n^{3/2} (M-n)^{3/2}} \quad 4-17$$

4.2.3 ANTENA TRANSMISSORA ABAIXO DOS EDIFÍCIOS

Quando a antena transmissora se situa suficientemente abaixo da linha média do topo dos edifícios uma expressão alternativa é apresentada.

$$Q_M = \left(\frac{d}{R-d} \right) \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi k \rho}} \left(\frac{1}{\theta_i} + \frac{1}{2\pi + \theta_i} \right) \right] \quad 4-18$$

com

$$\theta_i = -\tan^{-1} \left[\left(\frac{H_s - h_B}{d} \right) \right] \quad 4-19$$

e

$$\rho = \sqrt{(H_s - h_B)^2 + d^2} \quad 4-20$$



Neste caso considera-se que a segunda fileira de prédios está situada fora da região de transição da primeira fileira e, nesse caso, a borda do primeiro semiplano age como um fonte linear cuja amplitude depende da amplitude do campo incidente e do coeficiente de difração para o ângulo φ .

4.3 MÉTODO XIA

Xia [Xia97] propôs uma outra formulação, mais simplificada e ainda unificadora dos modelos de múltipla difração capaz de prever a perda de percurso nos casos da antena acima, abaixo e na mesma linha da média do topo dos edifícios.

Da mesma forma que as modelagens anteriores, ele utiliza a expressão da perda no espaço livre apresentada em (2-1) e a mesma expressão da perda pela difração até o solo utilizada na modelagem MBX e apresentada em (4-7).

A perda por múltipla difração será calculada conforme a posição da antena transmissora em relação ao nível médio dos edifícios.

4.3.1 ANTENA TRANSMISSORA ACIMA DOS EDIFÍCIOS

No primeiro, com a estação transmissora acima da linha média dos edifícios, Xia emprega a expressão

$$Q_N = 2.35 \left(\frac{\Delta h_b}{R} \sqrt{d} \right)^{0.9} \quad 4-21$$

Com as três componentes definidas, a expressão completa para a perda de percurso torna-se

$$L = -10 \text{Log} \left[\left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \right] - 10 \text{Log} \left[\frac{\lambda}{2\pi^2 R_{RTS}} \left(\frac{1}{\theta} - \frac{1}{2\pi + \theta} \right)^2 \right] - 10 \text{Log} \left[(2.35)^2 \left(\frac{\Delta h_b}{R} \sqrt{d} \right)^{1.8} \right]$$

4-22



4.3.2 ANTENA TRANSMISSORA NA MESMA LINHA DOS EDIFÍCIOS

Para o caso da antena na mesma linha dos edifícios, considerando $\Delta h_b=0$ chega-se a expressão

$$Q_N = \frac{1}{N} = \frac{d}{R} \quad 4-23$$

E a expressão final da perda de propagação

$$L = -10\text{Log}\left(\frac{\lambda}{2\sqrt{2\pi}R}\right)^2 - 10\text{Log}\left[\frac{\lambda}{2\pi^2 R_{RTS}}\left(\frac{1}{\theta_i} - \frac{1}{2\pi + \theta_i}\right)^2\right] - 10\text{Log}\left(\frac{d}{R}\right)^2 \quad 4-24$$

4.3.3 ANTENA TRANSMISSORA ABAIXO DO EDIFÍCIOS

O último caso, com a antena situada abaixo da linha dos edifício, Xia emprega a mesma expressão de MBX chegando à seguinte expressão para a perda de propagação total

$$Q_M = \left[\frac{d}{2\pi(R-d)}\right]^2 \frac{\lambda}{\sqrt{(\Delta h_b)^2 + d^2}} \left(\frac{1}{\phi} - \frac{1}{2\pi + \phi}\right)^2 \quad 4-25$$

$$L = -10\text{Log}\left(\frac{\lambda}{2\sqrt{2\pi}R}\right)^2 - 10\text{Log}\left[\frac{\lambda}{2\pi^2 r}\left(\frac{1}{\theta} - \frac{1}{2\pi + \theta}\right)^2\right] - 10\text{Log}\left\{\left[\frac{d}{2\pi(R-d)}\right]^2 \frac{\lambda}{\sqrt{(\Delta h_b)^2 + d^2}} \left(\frac{1}{\phi} - \frac{1}{2\pi + \phi}\right)^2\right\} \quad 4-26$$

Note novamente a divisão por dois do termo relativo a perda de espaço livre.

4.4 MÉTODO COST-231

Uma aplicação dos modelos apresentados é o método COST-231. Tal modelo foi desenvolvido pelo subgrupo de modelos de propagação (ETR 103 1995) e trata separadamente a propagação quando a linha de visada (street canyon) e quando existe obstrução.



Para o primeiro caso, o método se baseia em medições feitas na cidade de Estocolmo e para o segundo, numa combinação dos modelo de Walfisch e Bertoni com o modelo de orientação de ruas de Ikegami.

As expressões abaixo constituem o modelo COST-231

4.4.1 CASO LINHA DE VISADA

No caso em que há linha de visada entre o transmissor e o receptor, a perda de percurso é dada por:

$$L = 42.6 + 26 \log d + 20 \log f \quad 4-27$$

4.4.2 CASO OBSTRUÍDO

No caso em que não existe a linha de visada, a perda de percurso é subdividida nas três partes mencionadas anteriormente

$$L = L_{FS} + L_{MD} + L_{RTS} \quad 4-28$$

sendo L_{FS} a perda no espaço livre, L_{MD} a perda por múltipla difração e L_{RTS} a perda por difração até o nível da rua.

Esta última é dada por:

$$L_{RTS} = -16.9 - 10 \log(r_w) + 10 \log f + 20 \log(h_B - h_r) + L\varphi \quad 4-29$$

onde $L\varphi$ é o fator que responde pela orientação φ das ruas em relação a direção primária de propagação e é dado por:

$$L\varphi = -10 + 0.354\varphi \quad 0 \leq \varphi \leq 35^\circ \quad 4-30$$

$$L\varphi = 2.5 + 0.075(\varphi - 35) \quad 35^\circ \leq \varphi \leq 55^\circ \quad 4-31$$

$$L\varphi = 4.0 + 0.114(\varphi - 35) \quad 55^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ \quad 4-32$$

Quando a orientação das ruas não é conhecida, recomenda-se utilizar $\varphi=90^\circ$, o que fornecerá uma perda $L\varphi=0,01$ dB.



Isto é aproximadamente equivalente a supor que φ seja uma variável aleatória com distribuição uniforme o que leva a

$$L = \int_0^{90} L(\varphi)p(\varphi)d\varphi = 0.222 \text{ dB} \quad 4-33$$

A perda por difração múltipla é calculada através de

$$L_{MD} = -18\log(1+h_t+h_B) - 9\log d_B + k_a + k_d \log d + k_f \log f \quad 4-34$$

se $h_t - h_B \leq 0$, assume-se

$$-18\log(1+h_t+h_B) = 0 \quad 4-35$$

As constantes k_a, k_d e k_f são calculadas como mostrado a seguir:

$$k_a = 54 \quad h_t - h_B > 0 \quad 4-36$$

$$k_a = 54 - 0.8(h_t - h_B) \quad d \geq 0.5 \text{ e } h_t - h_B \leq 0 \quad 4-37$$

$$k_a = 54 - 0.8(h_t - h_B) \frac{d}{0.5} \quad d < 0.5 \text{ e } h_t - h_B \leq 0 \quad 4-38$$

$$k_d = 18 \quad h_t - h_B > 0 \quad 4-39$$

$$k_d = 18 - 15 \left[\frac{(h_t - h_B)}{h_B} \right] \quad h_t - h_B \leq 0 \quad 4-40$$

$$k_f = -4 + 0.7 \left(\frac{f}{925} - 1 \right) \quad 4-41$$

para cidades médias ou centros suburbanos com baixa densidade de árvores

$$k_f = -4 + 1.5 \left(\frac{f}{925} - 1 \right) \quad 4-42$$

para centros metropolitanos.



4.5 CONCLUSÕES

A partir dos modelos de propagação baseados em difração múltipla, foram apresentados alguns métodos de cálculo da perda de percurso para ambientes urbanos. Tais métodos se diferenciam dos métodos empíricos tradicionais pela consideração parâmetros objetivos do ambiente como largura de ruas ou altura média dos edifícios.

Os métodos apresentados guardam bastante semelhança entre si e diferem basicamente na forma do cálculo da perda desde o telhado do último edifício (L_{RTS}) e nas simplificações utilizadas no cálculo da perda por difração múltipla (L_{MD}), evitando ao máximo o uso de expressões recursivas cujo tempo de convergência é sempre um problema na implementação computacional.



UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

5 CONDIÇÕES DE MEDIDA



No intuito de avaliar a precisão e a aplicabilidade dos métodos de cálculo de perda de percurso apresentados no Capítulo 4, nos propusemos a compará-los com medidas reais de campo. Para tanto foram coletadas medidas em cinco diferentes regiões da cidade de Campinas, Estado de São Paulo, Brasil.

Para a realização das medidas, escolhia-se uma determinada célula e percorria-se de carro as ruas dentro de sua área de cobertura. Como o interesse da modelagem apresentada é mais voltada para células pequenas ou microcélulas, procurou-se restringir a coleta à, no máximo, 1,5 km da Estação Rádio Base e à abertura nominal da antena utilizada, conforme ilustra a figura 5-1.

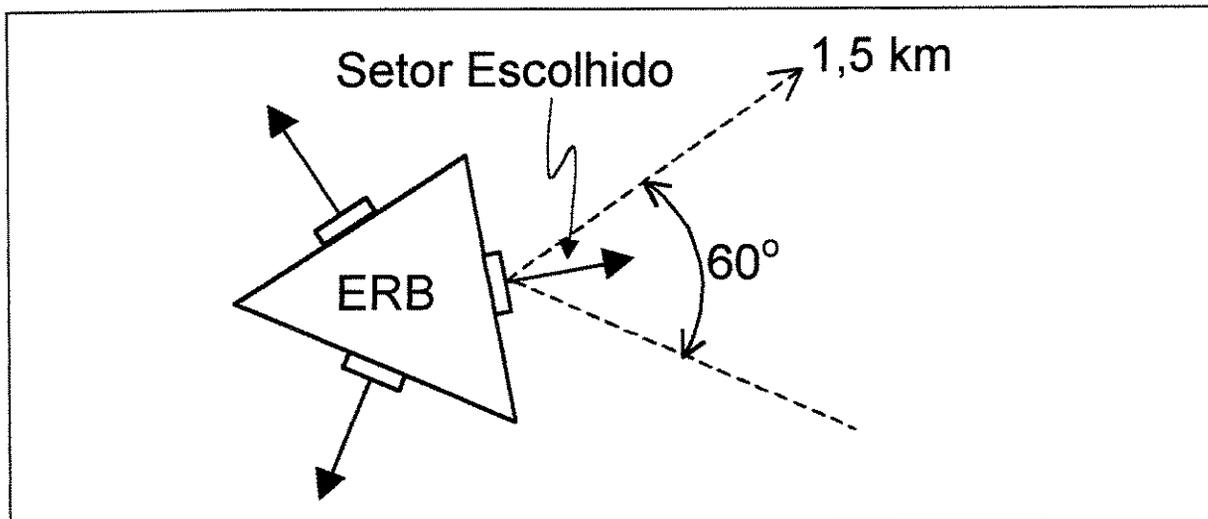


Figura 5-1-Área de Medida

5.1 ESCOLHA DAS ESTAÇÕES

Foram selecionados 5 setores de 5 diferentes Estações Rádio Base (ERB). Estas estações foram escolhidas por cobrirem regiões de características distintas seja no que diz respeito à topografia e ao uso do solo.

Por serem mais condizentes com as premissas da modelagem teórica apresentadas nos capítulos anteriores, foram escolhidas apenas estações do



tipo *roof-top*, em que o sistema radiante é montado sobre um edifício já existente e não sobre uma torre.

As estações analisadas operam na banda B da telefonia móvel celular, entre 870 e 890 MHz no enlace direto segundo o padrão definido na norma IS-136. A coleta foi feita através da medição do nível médio de sinal no canal de controle digital (DCCH).

A Tabela 5-1 descreve as principais características das ERB escolhidas para a coleta de dados e o local da cidade onde se encontram. É importante notar que os valores da Potência Efetivamente Radiada (ERP) apresentados já incluem o ganho da antena de transmissão (Cerca de 13 dBd³).

Medida	Local	Altura do Transmissor (H _t)(m)	ERP ⁴ (W)	ERP(dBm)
1	Cambuí	42	29,16	44,65
2	Cambuí+Centro	45	29,80	44,74
3	Proença/Estádios	33	53,50	47,28
4	Centro	33	21,44	43,31
5	Bonfim	32	28,92	44,61

Tabela 5-1-Potência e Altura das Estações Escolhidas

5.2 EQUIPAMENTO UTILIZADO

O aparato de medição utilizado foi um veículo de testes dotado de antenas receptoras externas munido do equipamento de medida RSAT 2000[®] de fabricação da empresa LCC, Inc. Para a coleta e pós processamento das medidas foram utilizados os pacotes aplicativos OptimEyes[®] e DeskCat[®] da mesma empresa. As antenas externas situavam-se a uma altura de aproximadamente 2m do solo, eram omnidirecionais com ganho aproximado de 3 dBd, o que foi descontado durante o pós-processamento. A frequência de amostragem foi de cerca de 1 medida a cada 1.1 s, ou seja, 0.9 Hz.

³ Decibéis em relação ao ganho de um dipolo

⁴ *Effectively Radiated Power*, Potência Efetivamente Radiada



5.3 DETERMINAÇÃO DO MODELO DE REFERÊNCIA

Para auxiliar a comparação entre os modelos, foi determinado um modelo de referência baseado na expressão da perda de percurso L dada por:

$$P(\text{dB}) = P(d_0) - 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (5-1)$$

Onde d_0 é uma distância básica de referência fixada em 10 metros e $P(d_0)$ a potência básica de referência, calculada através da expressão (2-1) da perda no espaço livre.

O parâmetro n foi então determinado para cada série de medidas ajustando a expressão 5-1 pelo método do Mínimo Erro Quadrático Médio (MMSE) [Rug88].

Os resultados são apresentados na tabela a seguir

Medida	Região	$d_0(\text{m})$	$P_0(\text{dBm})$	n
1	Cambuí	10	-63.80	3.70
2	Cambuí+Centro	10	-62.16	3.17
3	Proença/Estádios	10	-48.50	3.66
4	Centro	10	-57.97	4.62
5	Bonfim	10	-62.60	2.90

Tabela 5-2-Parâmetros para o Modelo de Referência

Tais valores de n estão em acordo com os valores obtidos na literatura [Wal88].

O modelo de referência, além de auxiliar na comparação entre os modelos de cálculo de perda de percurso, também permitiu a determinação dos parâmetros estatísticos do desvanecimento lento do sinal apresentado no Capítulo 6.



5.4 CARACTERÍSTICAS DAS REGIÕES MEDIDAS

5.4.1 MEDIDA 1 – BAIRRO DO CAMBUÍ

A medida número 1 foi realizada no bairro do Cambuí, uma região de perfil residencial e comercial caracterizada por edifícios de grande porte e em grande concentração.

5.4.2 MEDIDA 2 – BAIRRO DO CAMBUÍ E CENTRO

A medida 2 foi realizada também no bairro do Cambuí, abrangendo também parte do centro histórico de Campinas, onde se mesclam edificações de grande porte e em grande concentração com prédios antigos de poucos andares.

5.4.3 MEDIDA 3 – BAIRRO DO PROENÇA E ESTÁDIOS

A medida 3 abrange o bairro do Proença e a região denominada dos estádios, de características mais residenciais e com edifícios mais esparsos e de menor porte em média.

5.4.4 MEDIDA 4 - CENTRO

A medida 4 engloba a região do centro comercial antigo de Campinas, com grandes concentrações de edifícios de razoável porte, e também a presença de prédios mais antigos e menores.

5.4.5 MEDIDA 5 – BAIRRO DO BONFIM

A medida 5 foi realizada no bairro do Bonfim, uma zona residencial e de características mais suburbanas do que as demais.

5.5 DADOS OBTIDOS

A, Figura 5-2 ilustra as 5 séries de medidas coletadas (pontos) juntamente com o modelo de referência (linha cheia) mencionado no item 5.3.

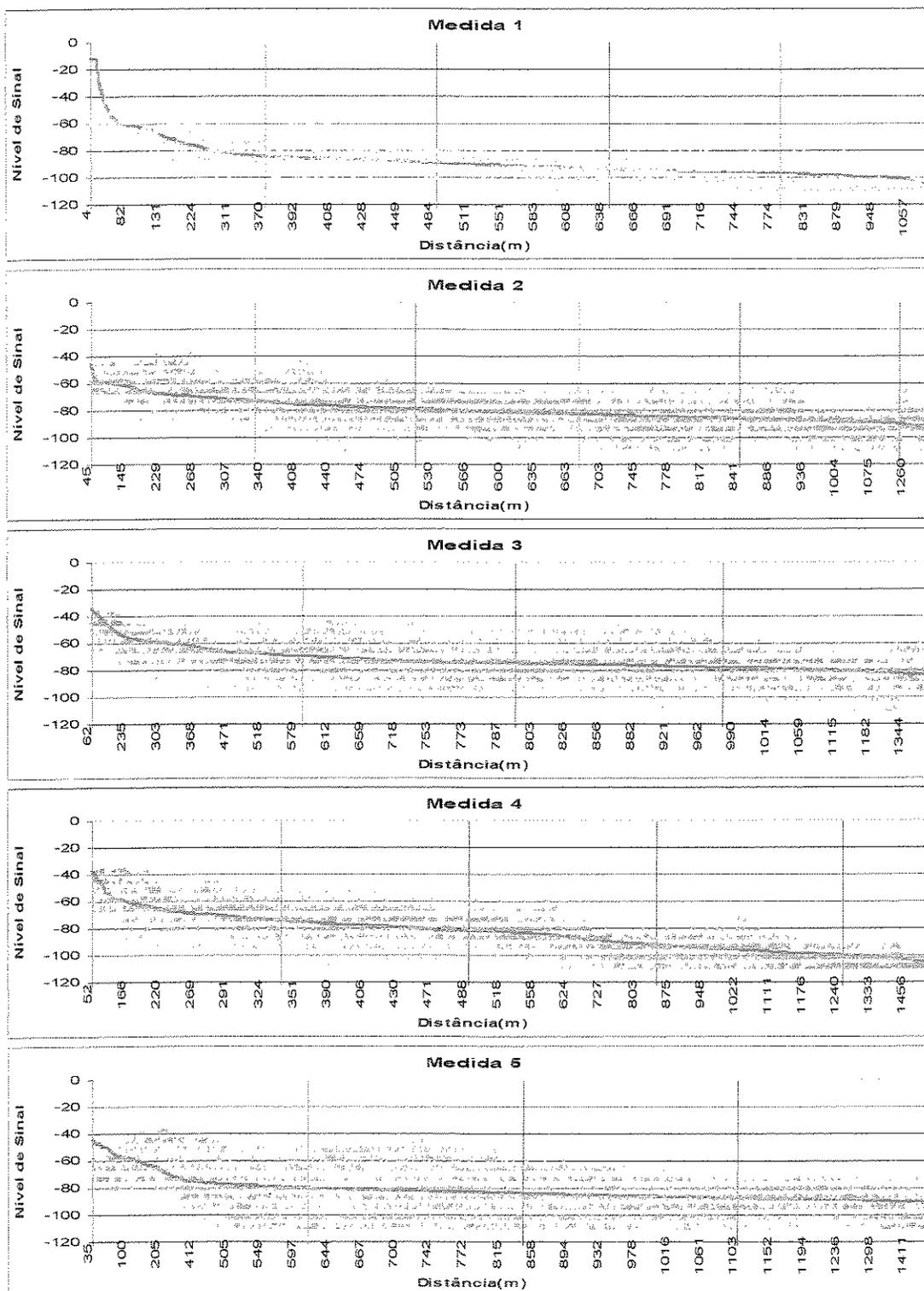


Figura 5-1-Medidas Realizadas e Modelo de Referência



5.6 CONCLUSÕES

Neste Capítulo apresentamos um conjunto de medidas de campo realizadas na cidade de Campinas. Apresentamos as condições em que foram realizadas tais medidas, os equipamentos utilizados e as características de cada região medida.

Apresentamos também um modelo de referência que será usado para a determinação da média local. Tal modelo é baseado no modelo de Lee computando a perda básica por propagação no espaço livre.

Atráves deste modelo foi possível ultrapassar as limitações impostas pela baixa freqüência de amostragem e realizar algumas análises estatísticas do ambiente medido que serão apresentadas no Capítulo 6.



UNICAMP

CÁLCULO DE PARÂMETROS ESTATÍSTICOS

6 CÁLCULO DE PARÂMETROS ESTATÍSTICOS



A média do nível de sinal que chega até um receptor sofre variações importantes, à medida em que o sinal, vindo do transmissor, sofre sombreamento por parte de obstáculos tais quais montanhas, edifícios e outras obstruções naturais ou feitas pelo homem. Tal variação é conhecida como desvanecimento lento, e como mostrado no Capítulo 2 esta distribuição estatística do sinal recebido segue uma distribuição normal quando o nível de sinal é representado logaritmicamente. É a distribuição lognormal.

Muito embora a frequência de amostragem utilizada para a coleta de dados fosse bastante baixa, foi possível determinar os dois parâmetros desta distribuição, que são a média e o desvio padrão σ , para as cinco séries de medidas. Para isso lançamos mão do modelo de referência apresentado no Capítulo 5.

O desvio padrão de uma série de pontos pode ser determinado aproximadamente a partir da expressão [Pap91]:

$$\sigma \approx \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (x_i - \eta)^2} \quad (6-1)$$

onde k é o número de pontos da série, x_i é o valor do i -ésimo ponto e η é a sua média.

Para obtermos o desvio padrão de cada série, utilizamos x_i como o valor medido e η , a média local estimada através da expressão 5-1 e dos parâmetros apresentados na Tabela 5-2.

A Tabela 6-1 mostra os valores de σ encontrados e na Fig. 6-1 está representada, sobre a forma de histograma, a distribuição de $x_i - \eta$ para as cinco séries de dados. A linha cheia é a função densidade de probabilidade normal para o valor de σ encontrado.



Medida	Região	σ [dB]
1	Cambuí	9.62
2	Cambuí+Centro	9.68
3	Proença/Estádios	10.28
4	Centro	8.96
5	Bonfim	14.54

Tabela 6-1-Valores obtidos

6.1 CONCLUSÃO

Apesar da baixa frequência de amostragem, conseguimos mostrar a concordância dos dados levantados em campo com o modelo exposto na seção 2.4.3.

Evidentemente tal concordância deve sempre ser avaliada em termos qualitativos, tendo em mente como a morfologia do ambiente se reflete nos parâmetros obtidos e levando sempre em conta a complexidade do ambiente de propagação rádio-móvel.

Os valores de desvio padrão encontrados estão compatíveis com aqueles relatados na literatura para cidades de mesmo porte [Rap96].

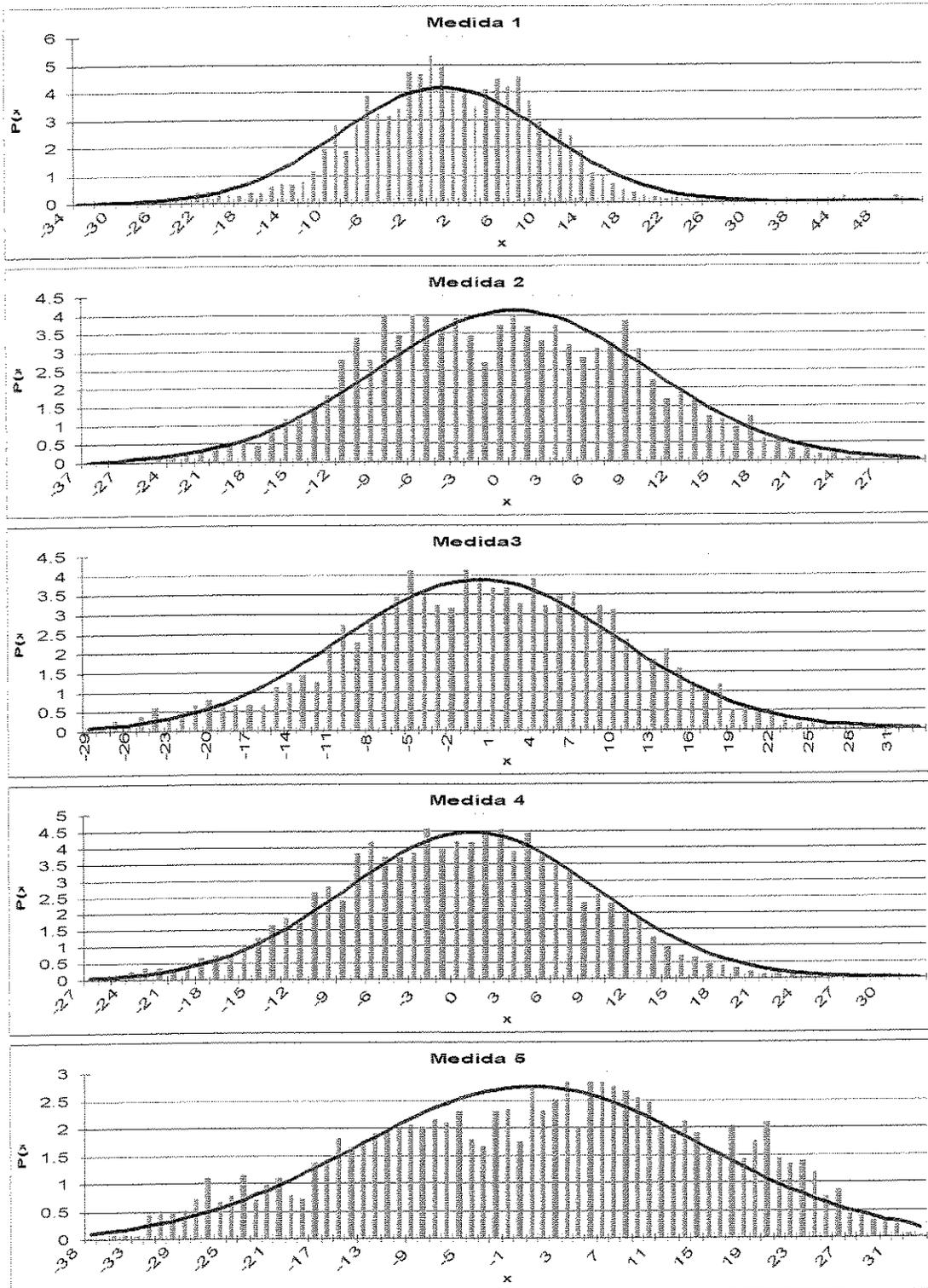


Figura 6-1 – Distribuição de $x_i - \eta$



UNICAMP

ANÁLISE DOS MÉTODOS APRESENTADOS

7 ANÁLISE DOS MÉTODOS APRESENTADOS



7.1 INTRODUÇÃO

O objetivo deste capítulo é comparar os métodos de predição de perda de percurso apresentados no Capítulo 4 com as medidas de campo apresentadas no Capítulo 5.

7.2 IMPLEMENTAÇÃO DOS MODELOS

Para realizar tal intento, foram implementados computacionalmente os métodos:

- Walfisch-Bertoni (Seção 4.1)
- Xia (Seção 4.3)
- MBX (Seção 4.2)
- COST-231 (Seção 4.4)
- Modelo de Referência (Seção 5.3)

7.3 PARÂMETROS UTILIZADOS

Uma das maiores dificuldades na realização da comparação com os resultados obtidos em campo é a definição dos parâmetros envolvidos nos modelos. Na ausência de uma base de dados precisa e considerando que se trata de métodos de predição do tipo área-a-área, onde nenhum conjunto de parâmetros se encaixaria perfeitamente, a solução foi utilizar um grupo de parâmetros para cada uma das regiões medidas, parâmetros estes obtidos por inspeção visual.

A Tabela 7-1 mostra os valores admitidos para cada uma das Regiões de Medidas



Medida	Região	HB (m)	d (m)	x(m)
1	Cambuí	30	50	10
2	Cambuí+Centro	20	50	10
3	Proença/Estádios	10	100	10
4	Centro	30	30	10
5	Bonfim	10	100	10

Tabela 7-1-Parâmetros Utilizados

Sendo:

HB	Altura média dos edifícios
d	Distância média entre os edifícios
X	Largura média da via

Tabela 7-2- Descrição dos Parâmetros Utilizados

Convém ressaltar que a distância entre os edifícios H_b , foi admitida como a distância média entre as edificações acima de 3 ou 4 andares, que teriam papel relevante na propagação do sinal.

O valor do ângulo φ entre o caminho principal do sinal e a direção da via, usado no modelo Walfisch-Ikegami (COST-231) foi admitido com $\pi/2$, conforme colocado no Capítulo 3.

7.4 RESULTADOS OBTIDOS

As Figuras 7-1 a 7-5 ilustram os resultados obtidos em cada uma das regiões medidas. Cada curva representa um método de predição conforme a legenda e a indicação.



A Tabela 7-3 mostra os valores do desvio padrão entre o sinal medido e a média local calculado segundo o mesmo procedimento descrito para as cinco séries de medidas e quatro métodos analisados.

As Figuras 7-6 a 7-10 mostram a distribuição de $x-x'$ sendo x o valor do nível de sinal medido em cada ponto e x' o nível obtido à partir do método indicado.

Foram escolhidos para tal ilustração apenas um método para cada série de medidas.

Medida	COST-231	MBX	WALFISCH -BERTONI	XIA	REFERÊNCIA
1	8,64	10,03	9,50	11,33	9,62
2	9,88	10,35	11,30	12,42	9,68
3	10,73	11,69	16,25	14,17	10,28
4	13,49	19,26	24,09	21,32	8,96
5	15,78	16,93	18,45	16,93	14,54

Tabela 7-3 – Resultados obtidos

7.5 CONCLUSÃO

7.5.1 MÉTODO WALFISCH-BERTONI

O método de Walfisch e Bertoni apresentou bons resultados em relação ao modelo de referência, uma vez que a diferença entre a altura dos edifícios e a do receptor era grande, enquadrando-se nas condições para os quais ele foi desenvolvido.

Pudemos notar que a perda de percurso é superestimada em até mais de 10 dB no caso da medida 4 que trata da região mais central e possivelmente muito diferente das premissas de modelagem deste método.



7.5.2 MÉTODO XIA

O Método Xia em todos os casos superestimou a perda de percurso, sendo esta característica mais acentuada na medida 4, ou seja a área mais central.

7.5.3 MÉTODO MBX

O método MBX apresentou resultados bastante bons para as áreas mais "previsíveis" que são as Medidas 1 a 3. Uma tendência bastante clara pareceu ser a de subestimar a perda de percurso até os primeiros 300 metros, passando a superestimá-la depois disso.

7.5.4 MÉTODO COST-231

O método COST-231 foi o que apresentou melhor concordância entre a predição e o sinal medido. Observamos que dos métodos apresentados, as previsões deste método são bastante razoáveis especialmente nas regiões de características mais marcadamente suburbanas, onde as edificações tendem a se organizar em blocos ou fileiras, muito embora a cidade de Campinas, nas regiões estudadas, não tenha tido este tipo de planejamento urbano.

É interessante notar que o método de Walfisch-Ikegami, embora com menor número de parâmetros e sempre supondo o ângulo ϕ de pior caso, mostrou sempre ser um dos que melhor aproxima a curva de referência.

No caso da medida número 4, relativa à região central de Campinas, notamos que todos os métodos apresentaram previsões bastante pessimistas. Muito embora esta discrepância possa ser explicada pelo fato de uma parte considerável da rota de medição passar por viadutos, o que elevaria o nível médio do sinal medido. Outro fator importante é que todos os métodos desprezam os efeitos do multipercurso, o que tende a causar um erro maior em regiões mais densas.

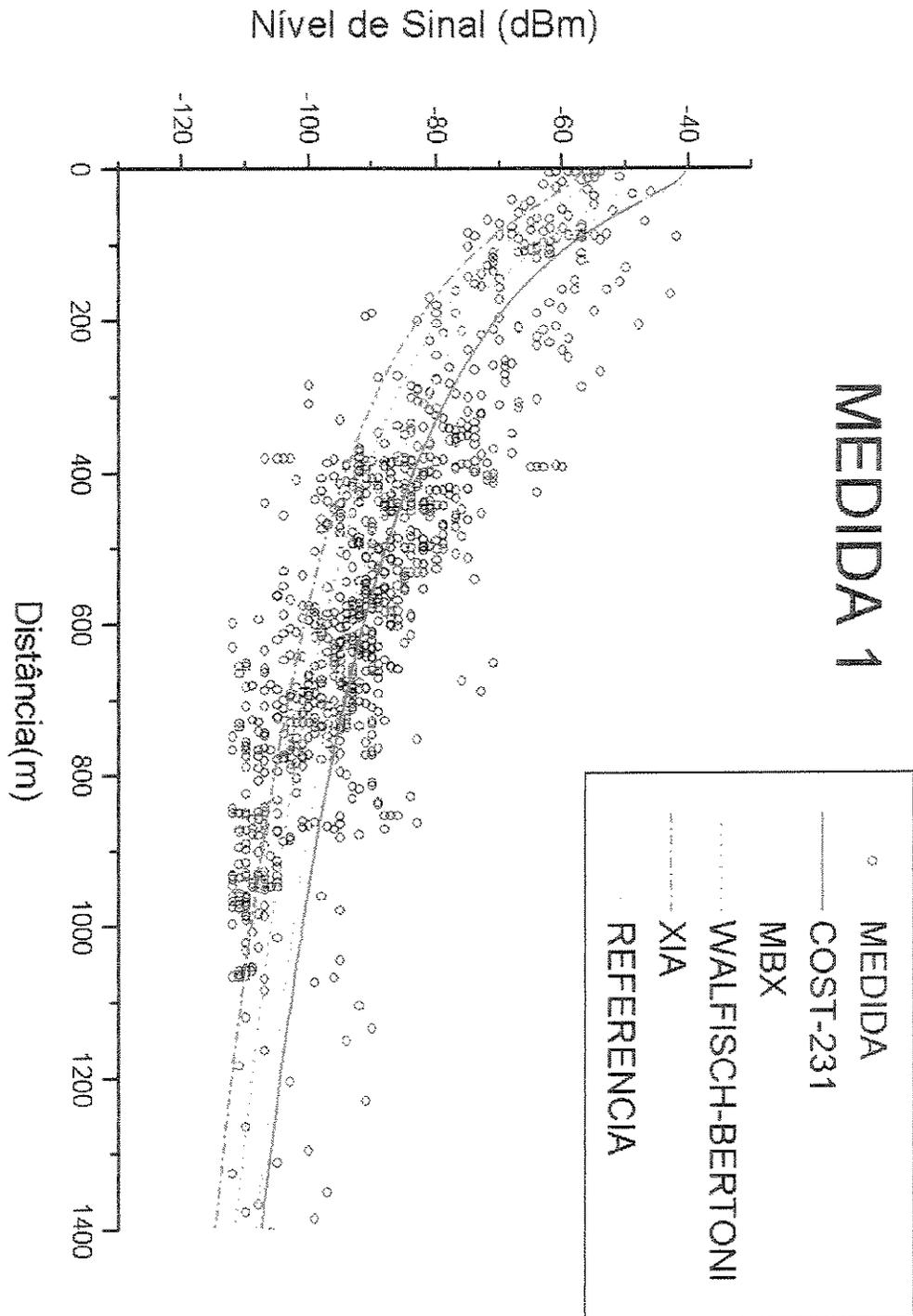


Figura 7-1

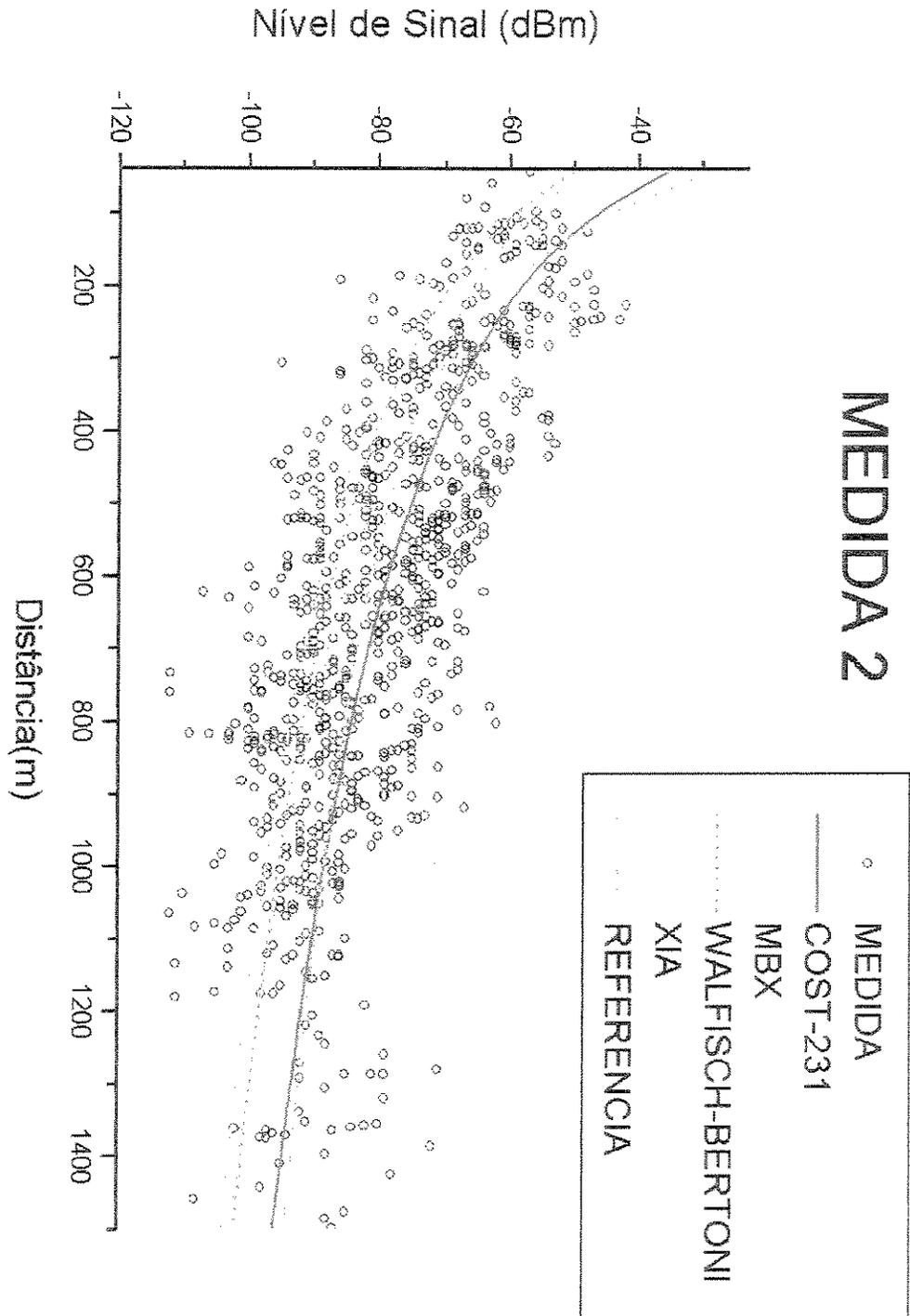


Figura 7-2

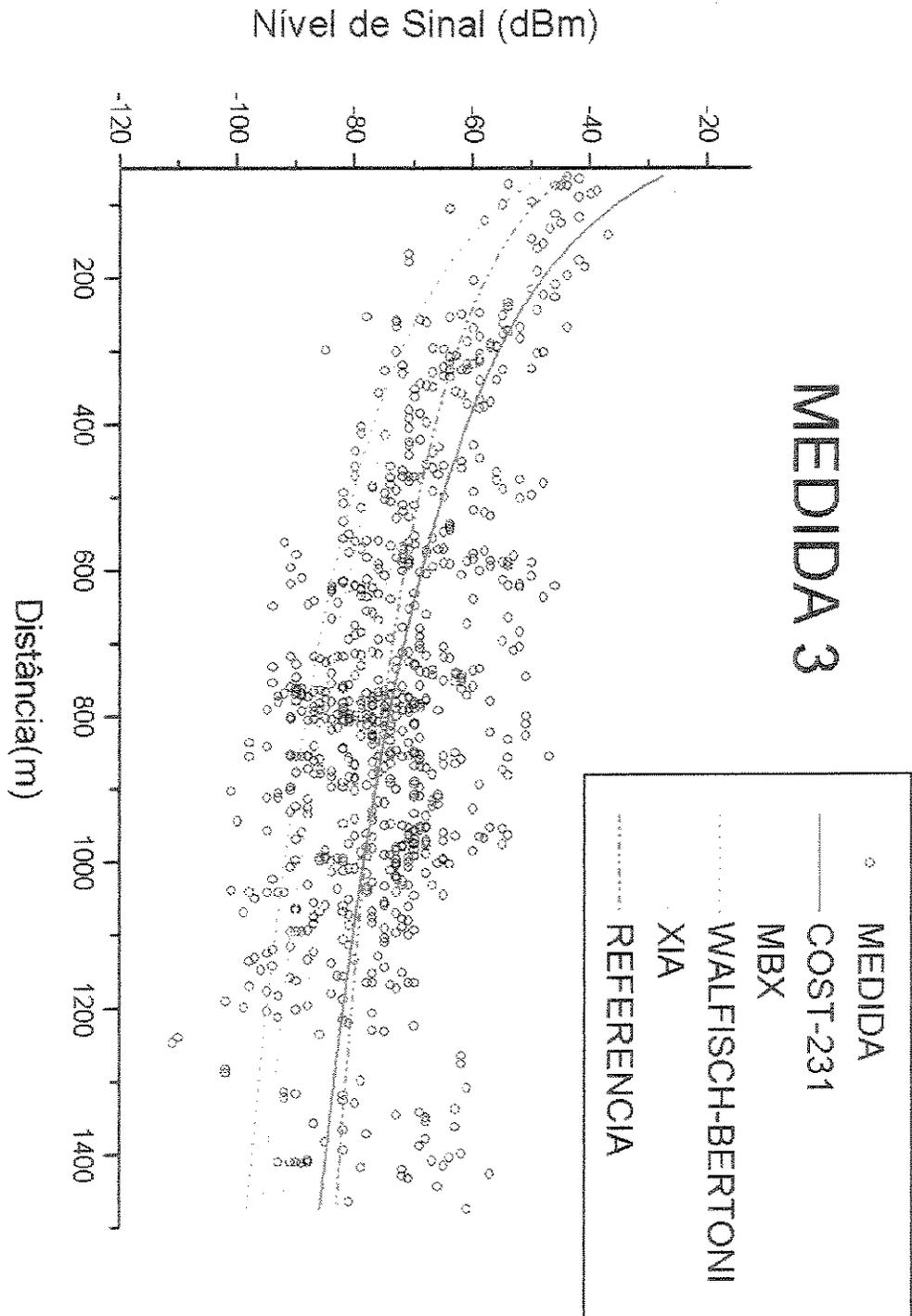


Figura 7-3

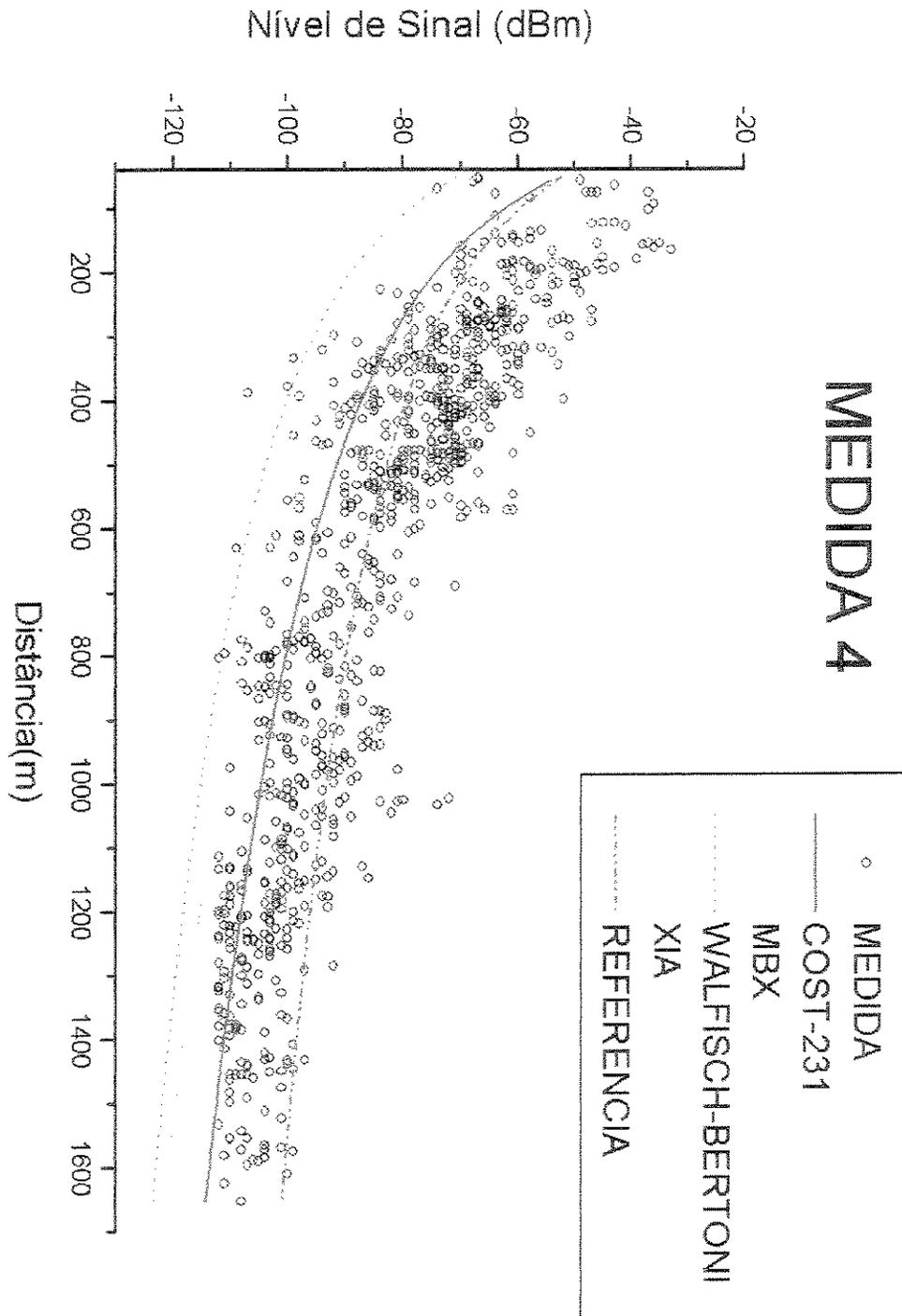


Figura 7-4

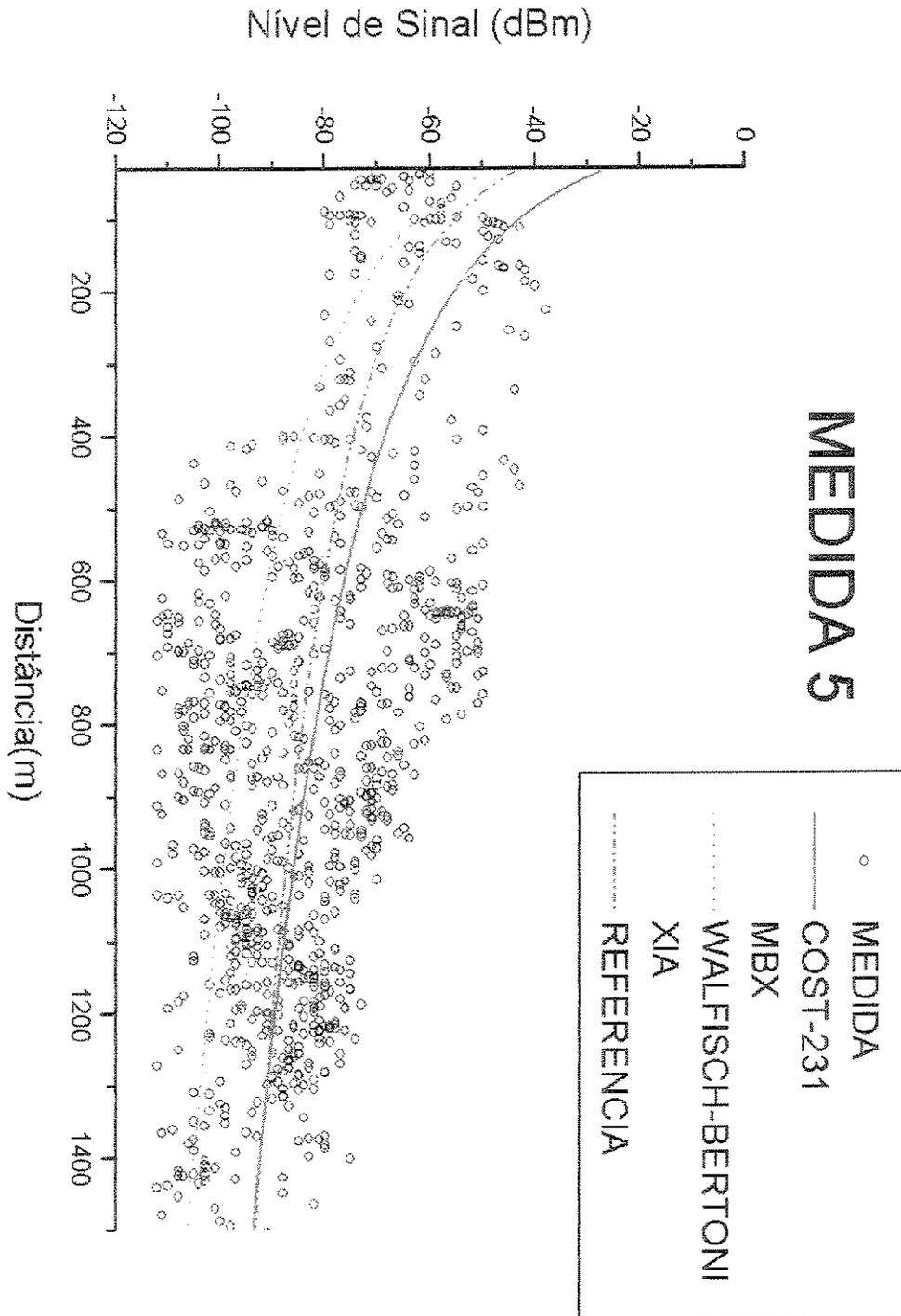


Figura 7-5

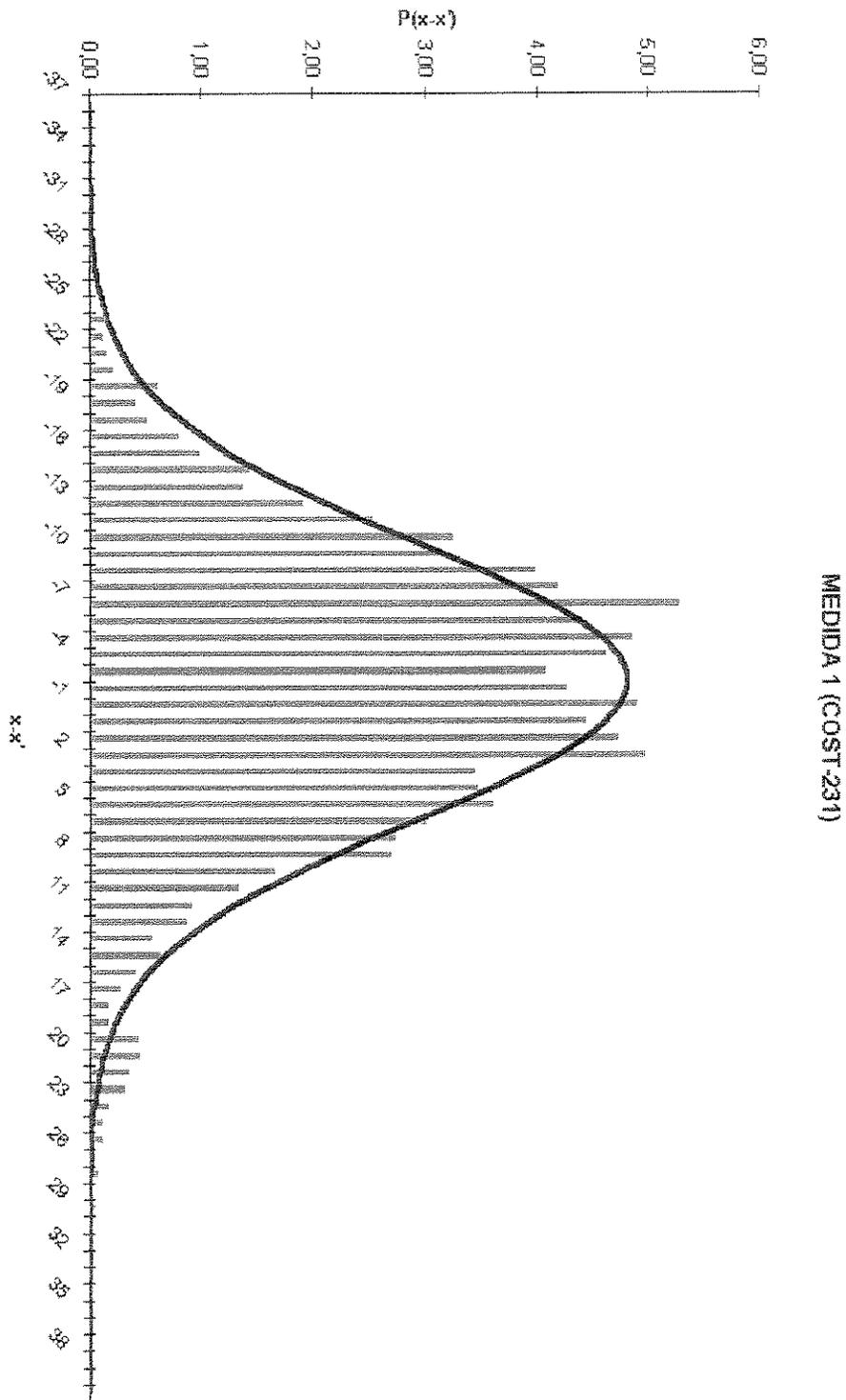


Figura 7-6

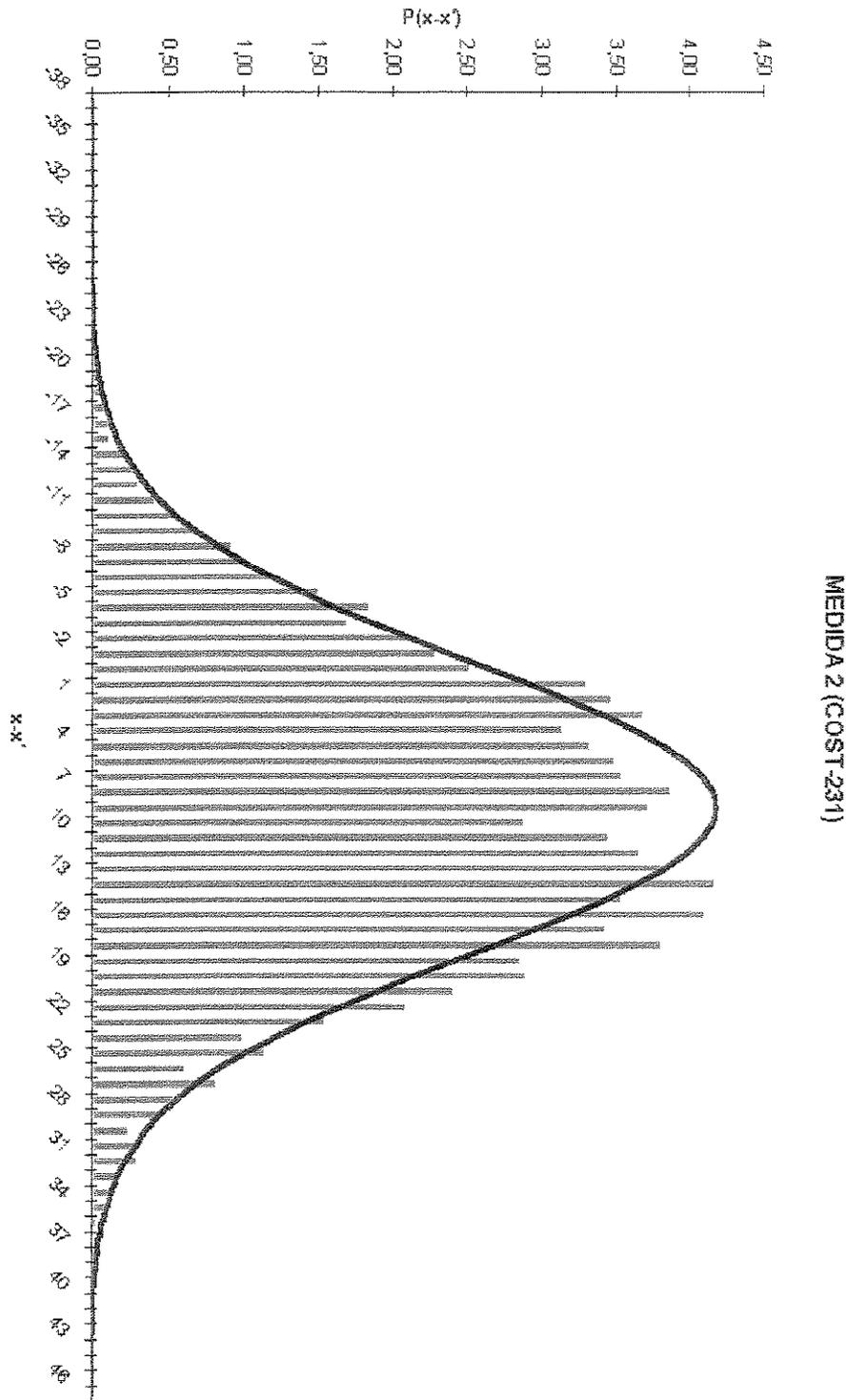


Figura 7-7

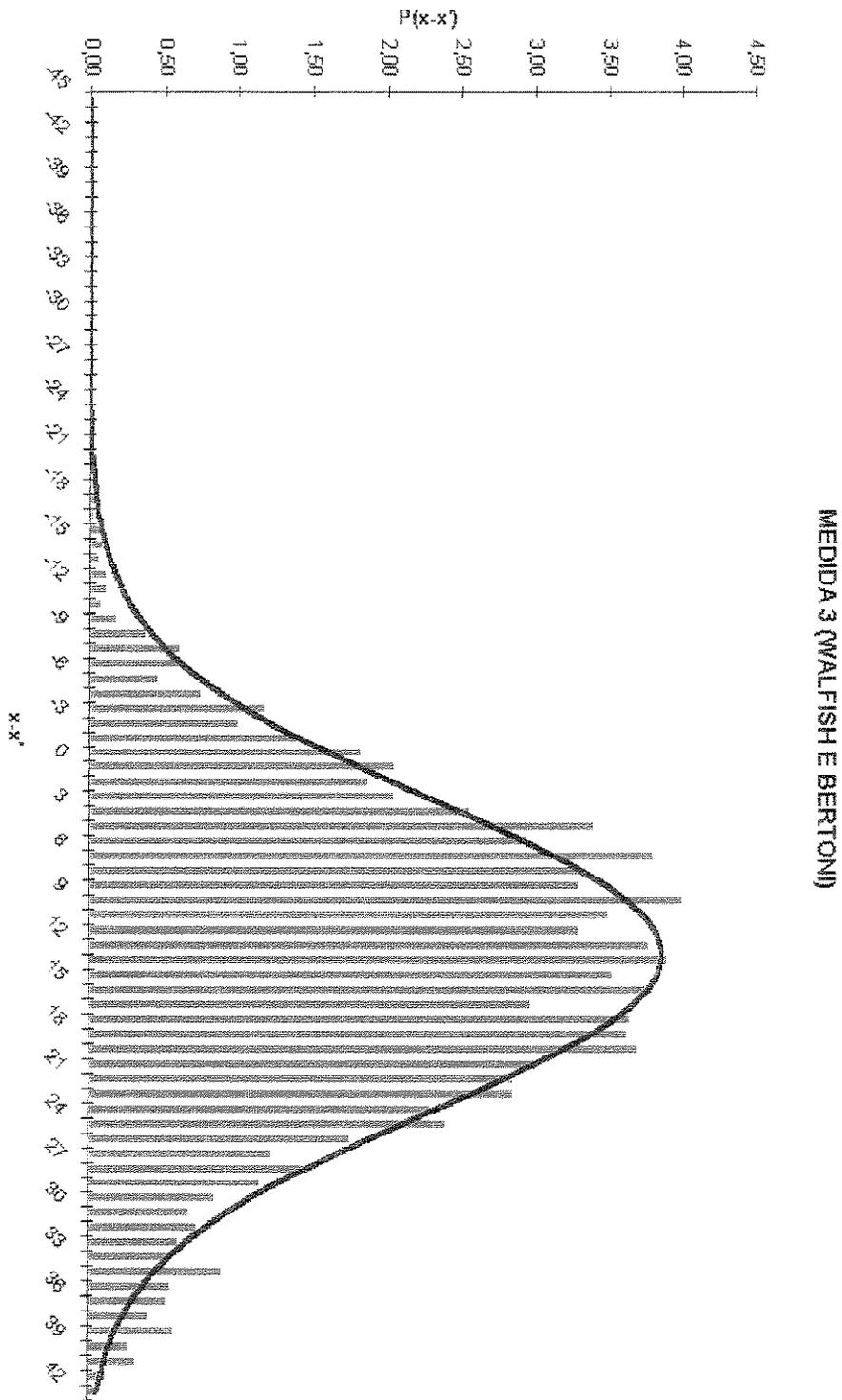


Figura 7-8



UNICAMP

ANÁLISE DOS MÉTODOS APRESENTADOS

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

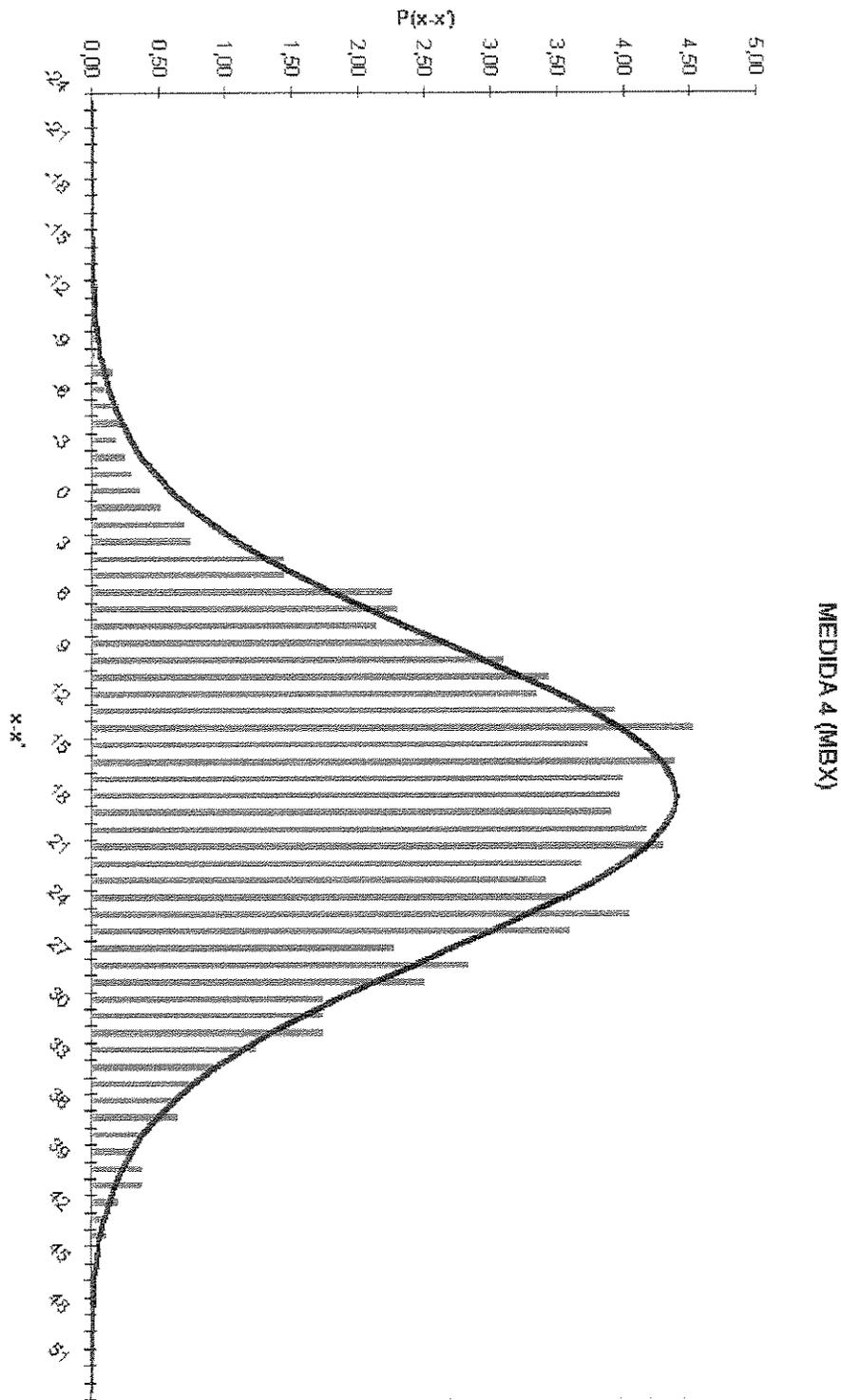


Figura 7-9

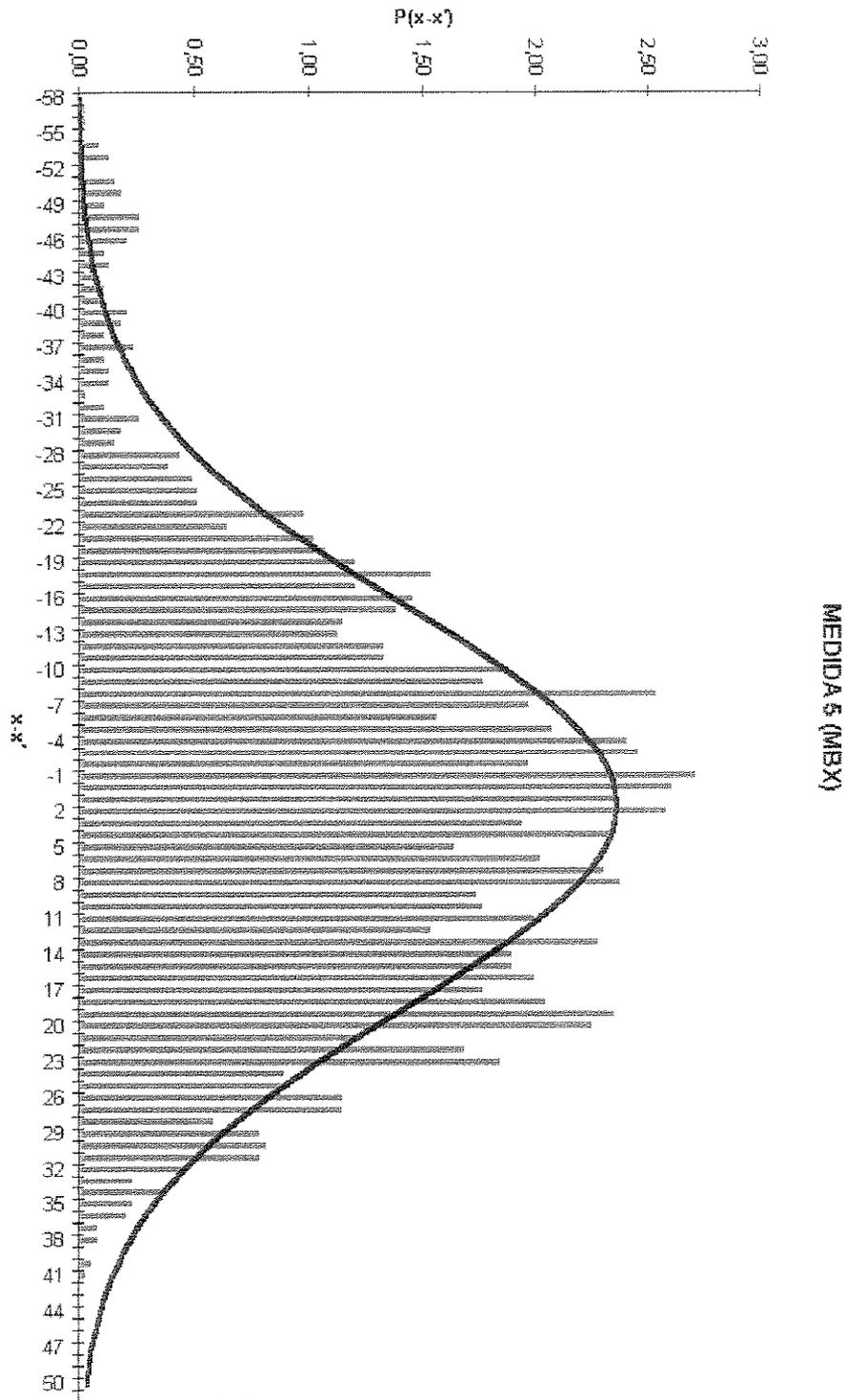


Figura 7-10



UNICAMP

CONCLUSÃO

8 CONCLUSÃO



Pela comparação entre os dados experimentais e aqueles obtidos através dos métodos estudados, entendemos que nenhum deles é inadequado para a predição da perda de percurso. Os valores de desvio padrão obtidos foram, em geral, semelhantes àqueles obtidos com métodos usados na indústria, se levarmos em conta que todo o trabalho foi desenvolvido com modelos do tipo área-a-área. Notamos que em algumas regiões, todos os métodos apresentam resultados menos satisfatório. Essas regiões são justamente aquelas que menos se encaixam no padrão suburbano adotado como premissa de modelagem. É arriscado entretanto afirmar que os métodos não são adequados para estas áreas, uma vez que são muitos os fatores que podem introduzir desvios na comparação, conforme será descrito a seguir.

8.1 CONTRIBUIÇÕES

O presente trabalho apresentou de forma sucinta e inter-relacionada uma série de modelos que procuram descrever a propagação de ondas eletromagnéticas em ambientes urbanos e suburbanos através do fenômeno da difração múltipla.

Tais modelos, na verdade, constituem-se vertentes de uma fonte única e se diferenciam pela modo de aplicação da solução integral do problema genérico de difração múltipla proposta por Furutsu. Dentre os métodos apresentados, decidimos pela não utilização do modelo proposto por Vogler, dada a sua complexidade e problemas de convergência conhecidos.

Implementamos os outros quatro métodos e seus resultados foram comparados com cinco medições em campo.

Obtivemos os parâmetros estatísticos destes dados e mostramos que estão de acordo com aqueles encontrados na literatura e portanto são válidos para os propósitos pretendidos.



Como resultado derivado deste processo, obtivemos os coeficientes de perda de percurso para algumas regiões da Cidade de Campinas, que podem ser classificado como típicos de regiões urbanas e densamente urbanas.

8.2 FATORES INTRODUTORES DE ERRO

São muitos os fatores que podem introduzir desvios e comprometer a confiabilidade da análise realizada.

O principal deles certamente é a imprecisão na obtenção dos parâmetros morfológicos descritivos do ambiente onde a aproximação se dá, pois nem sempre é possível confiar na estimativa feita.

Ainda que uma base de dados de alta resolução estivesse disponível, ela dificilmente levaria em conta detalhes como a existência de muitos viadutos no percurso de teste como ocorreu no caso de uma das medidas

Outro fator importante é aplicabilidade das premissas de modelagem. A premissa de organização das cidades em blocos quadrados com fileiras de prédios igualmente espaçadas é certamente uma abstração na maior parte das cidades do Brasil. O desprezo dos raios secundários também se torna discutível à medida que a morfologia foge desses padrões.

8.3 SUGESTÃO PARA FUTUROS TRABALHOS

Todo o presente trabalho foi desenvolvido com base em métodos área-a-área. Com a crescente facilidade para a obtenção de bases de dados de alta resolução, acreditamos que a implementação de simuladores que implementem os métodos apresentados numa estrutura ponto-a-ponto, onde os parâmetros como altura média de edifícios fosse calculado para cada raio e levando em consideração a propagação de mais de um raio, seja um trabalho desafiador e promissor para o futuro.



BIBLIOGRAFIA

- [Abs64] Abramowitz, M. e Stegun, I.A. "Handbook of Mathematical Functions" Appl. Math. Series, vol 55 National Bureau of Standards, 1964
- [Boe78] Boersma, J., "On Certain Multiple Integrals Occuring in a Waveguide scattering problems." JSIAM J. Math. Anal. Vol 9, N.2 pp. 377-393, 1978
- [Feu94] Feuerstein, M.J., Blackard, K.L., Rappaport, T.S., Seidel, S.Y., e Xia, H.H., "Path Loss, Delay Spread, and Outage Models as Functions of Antenna Height for Microcellular Systems Design", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol 43, No. 3, pp. 487-498, Agosto 1994.
- [Fur63] Furutsu, K. "On the theory of radio wave propagation over inhomogeneous earth" J. Res. Natnl. Bur. Stand., Sect. D.67, 39-62
- [Gon97] Gonçalves, N.M., "Modelo de Propagação para Sistemas Micro-Celulares Urbanos na Banda de UHF", Dissertação de Mestrado, I.S.T. U.T. Lisboa, Outubro 1997.
- [Hat90] Hata, Massaharu, "Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services", IEEE Transactions on Vehicular Technologies, Vol VT-29, No 3 , pp. 317-325, Agosto 1980.
- [Lee85] Lee, W.C.Y., "Mobile Communications Engineering" McGraw Hill Publications, Nova Iorque, 1985.
- [Mbx93] Maciel, L.R., Bertoni, H.L. e Xia, H.H., "Unified Approach to Prediction of Propagation over Buildings for All Ranges of Base Station Antenna Height" IEEE Transactions on Vehicular Technologies, Vol 42, Fevereiro 1993.
- [Oku68] Okumura, T., Ohmori, E. e Fukuda, K. , "Field Strength and Its Variability in VHF and UHF Land Mobile Service" Review Electrical Communication Laboratory, Vol 16, N.o 9-10 pp. 825-873, Setembro-Outubro 1968.
- [Ott78] Ott, J.D. e Plitkins, A. "Urban Path Loss Characteristics at 820 MHz" IEEE Trans. Veh. Tech., Vol VT-27, pp.182-189, 1978.
- [Pap91] Papoulis, A., "Probability, Random Variables and Stochastic Processes" 3a Edição, McGraw Hill, 1991.
- [Rap96] Rappaport, T.S. "Wireless Communication – Principles and Practice" Prentice Hall, 1996
- [Rug88] Ruggiero, M. A. G. e Lopes, V. L. R., "Cálculo Numérico – Aspectos Teóricos e Computacionais" McGraw Hill, 1988
- [Vog81] Vogler, L.E. "The attenuation of Electromagnetic Waves by Multiple Knife-Edge Diffraction" NTIA Report, 1981
- [Vog82] Vogler, L.E. "An attenuation function for multiple knife-edge diffraction"



LINICAMP

BIBLIOGRAFIA

Radio Science Vol. 17, Número 6 , pp. 1541-1546, Novembro-Dzembro 1982.

[Wai88] Walfisch, J. e Bertoni, H.L., "A Theoretical Model of UHF Propagation in Urban Environments" , IEEE Trans. on Antennas and Propagation, Vol 36, N.12, Dezembro 1988

[Xia97] Xia, H.H., "A Simplified Analytical Model for Predicting Path Loss in Urban and Suburban Environment" IEEE Transactions on Vehicular Technologies, Vol 46 Novembro 97

[XiB92] Xia, H.H. e Bertoni, H.L., "Diffraction of Cylindrical and Plane Waves by an Array os Absorbing Half Screens" IEEE Trans. on Antennas and Propagation, Vol 40 N. 2 Fevereiro 1992

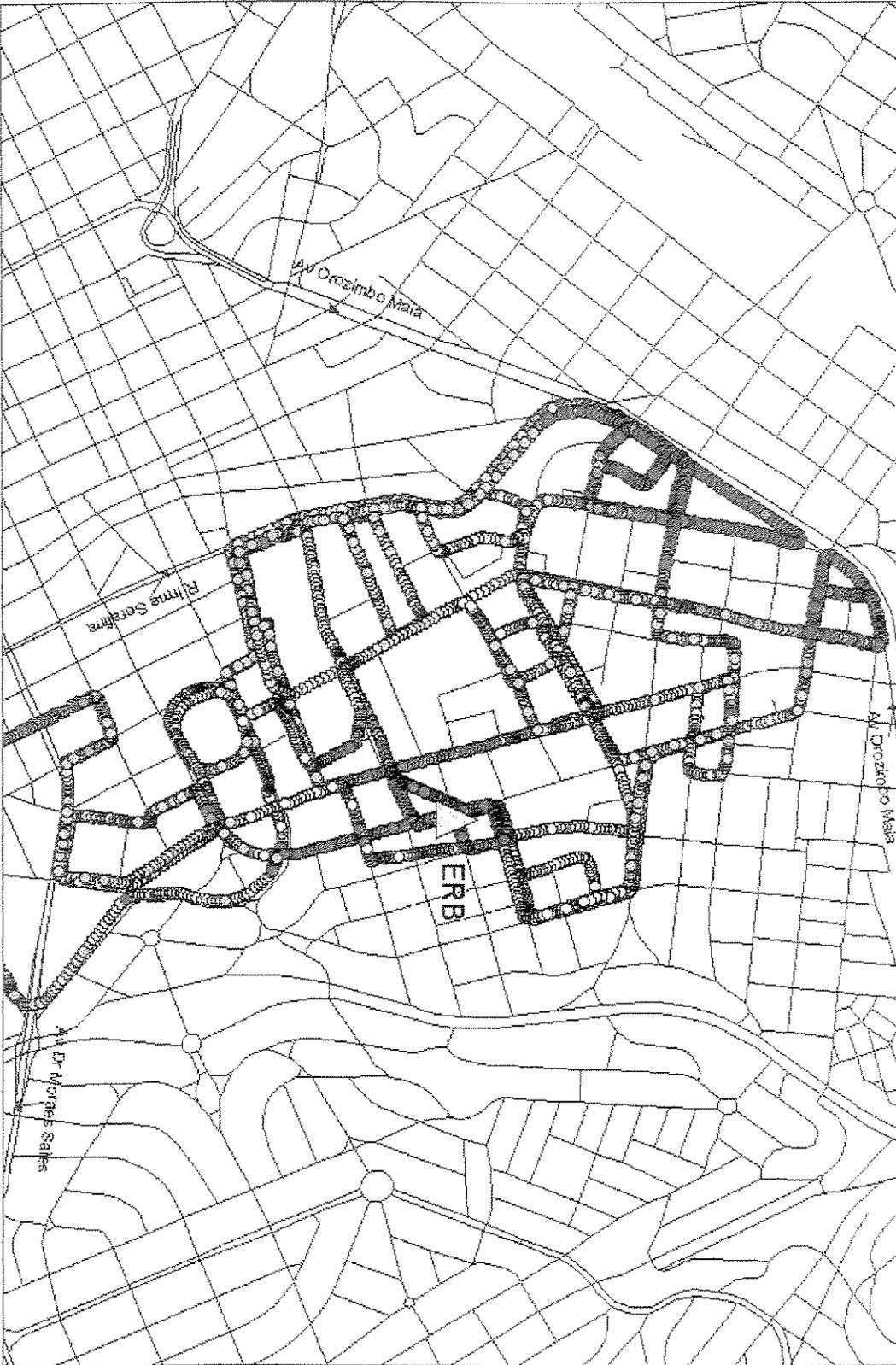
[Yac93] Yacoub, M. D. , "Foundations of Mobile Radio Engineering", CRC Press, Boca Raton



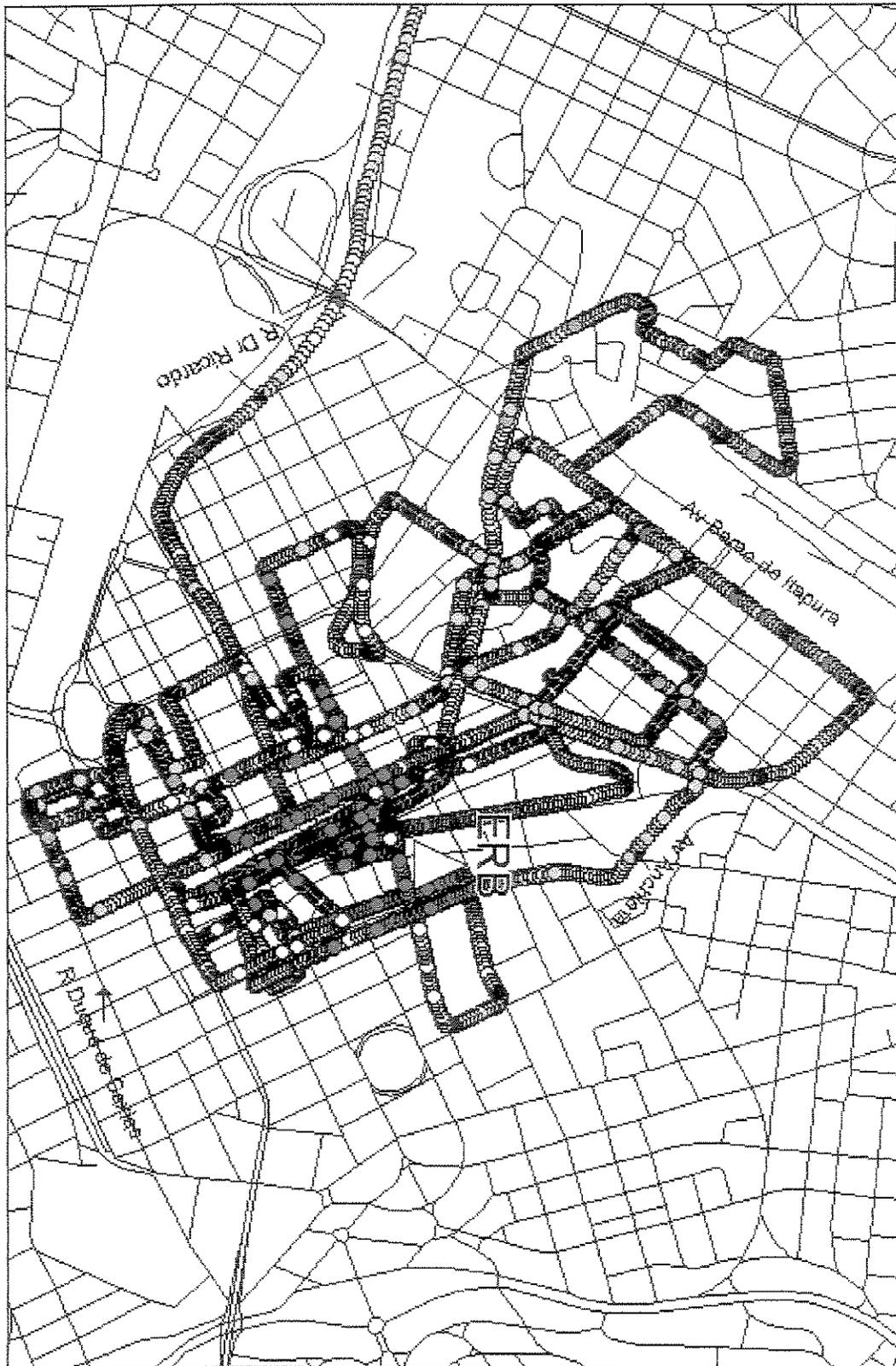
APÊNDICE – MAPAS DAS MEDIDAS

LEGENDA (dBm)

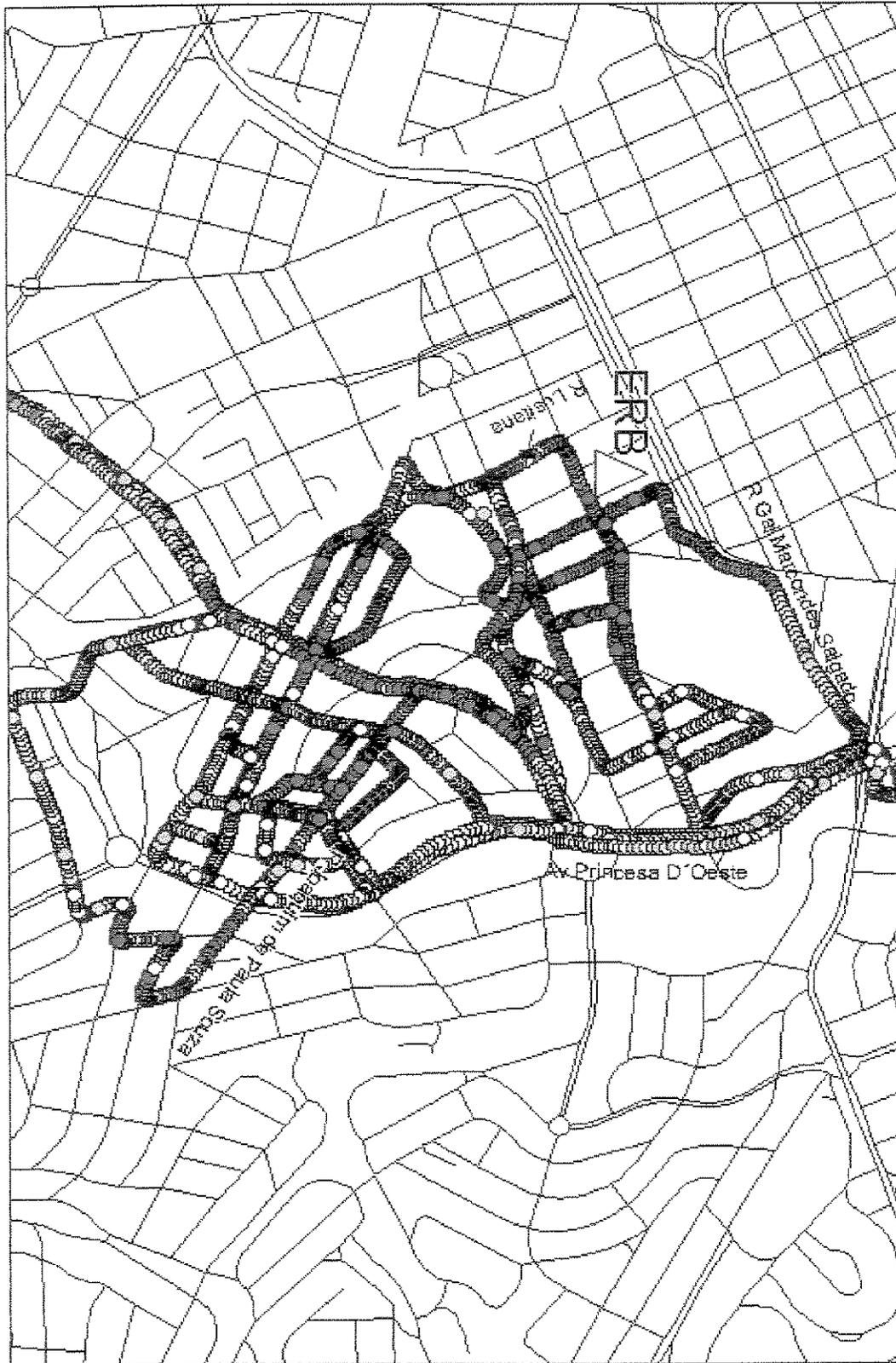
- -70 to 0
- -80 to -70
- ⊗ -90 to -80
- ⊙ -100 to -90
- ⊕ -110 to -100
- ⊖ -120 to -110
- ⊗ -199 to -120



Medida 1



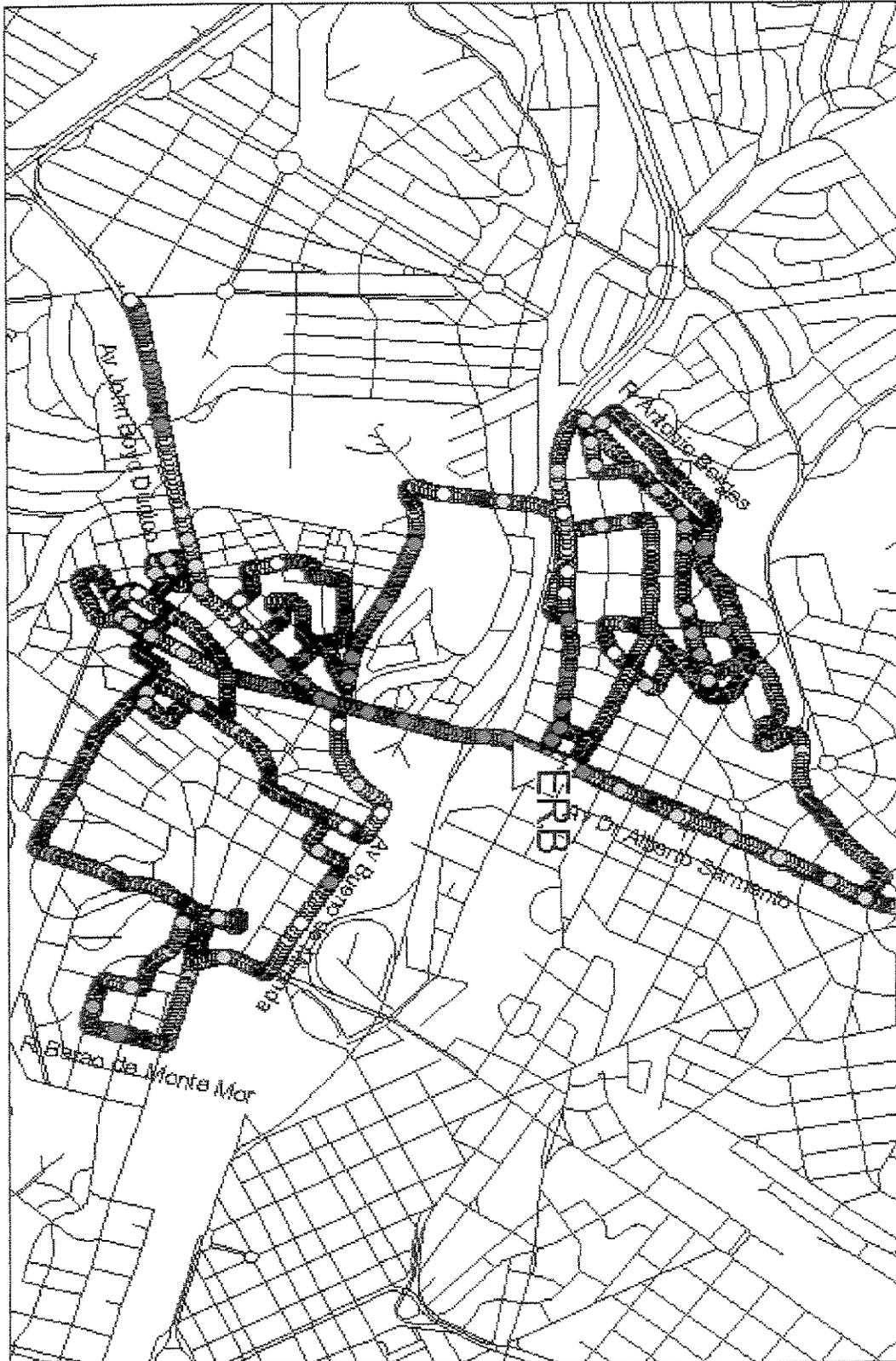
Medida 2



Medida 3



Medida 4



Medida 5