

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Tese de Doutorado

MODELAGEM E MEDIÇÕES DE ONDAS DE RÁDIO PARA
PREDIÇÃO DE PERDA DE PROPAGAÇÃO EM AMBIENTES
URBANOS

Autor: MSc. Ronaldo de Andrade Martins
Orientador: Prof. Dr. Laércio Martins de Mendonça
Co-Orientador: Prof. Dr. Adaildo Gomes d'Assunção

Junho/2006

Natal-RN

MODELAGEM E MEDIÇÕES DE ONDAS DE RÁDIO PARA PREDIÇÃO DE PERDA DE PROPAGAÇÃO EM AMBIENTES URBANOS

RONALDO DE ANDRADE MARTINS

Tese aprovada em 12/Junho/2006

Prof. Laércio Martins de Mendonça, Dr. Eng. – UFRN
Orientador:

Prof. Adaildo Gomes d'Assunção, Dr. Eng. – UFRN
Co-Orientador

Prof. Gervásio Protásio dos Santos Cavalcante, Dr. Eng. - UFPA
Componente da Banca

Prof. Alfredo Gomes Neto, Dr.Sc. - CEFET-PB
Componente da Banca

Prof. Antonio Luiz Pereira de Siqueira Campos, Dr. Eng. - UnP
Componente da Banca

Natal – RN
Junho/2006

Ata da 16ª sessão de defesa de Tese de Doutorado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da UFRN, realizada em 12 de junho de 2006 no auditório do Centro de Tecnologia/UFRN.


1 Aos 12 (doze) dias do mês de junho do ano de dois mil e seis, foi
 2 realizada a 16ª sessão de defesa de tese de doutorado do Programa de Pós-
 3 Graduação em Engenharia Elétrica da UFRN, na qual o doutorando *Ronaldo de*
 4 *Andrade Martins* apresentou o Trabalho que tem como título: "*Modelagem e*
 5 *Medição de Ondas Eletromagnéticas para Predição de Perda de Propagação*
 6 *em Ambientes Urbanos*". A sessão teve início às 14:30h, tendo a banca
 7 examinadora sido constituída pelos professores: Laércio Martins de Mendonça
 8 (D., UFRN - Orientador), Adaildo Gomes d'Assunção (Dr., UFRN - Co-
 9 orientador), Gervásio Protásio dos Santos Cavalcante (Dr., UFPA - examinador
 10 externo), Alfrêdo Gomes Neto (Dr., CEFET-PB - examinador externo) e
 11 Antonio Luiz Pereira de Siqueira Campos (Dr., UnP - examinador interno).


12 Após a apresentação do trabalho e o exame pela banca, o doutorando foi
 13 considerado *Aprovado*, do que eu, José Santana da Silva, lavrei a
 14 presente ata, que vai assinada pelos examinadores, pelo aluno e por mim.


 Dr. Laércio Martins de Mendonça
 (Orientador)


 Ronaldo de Andrade Martins
 (Doutorando)


 Dr. Adaildo Gomes d'Assunção
 (Co-orientador)


 José Santana da Silva
 (Secretário do PPgEE)


 Dr. Gervásio Protásio dos Santos
 Cavalcante
 (examinador. externo)


 Dr. Alfrêdo Gomes Neto
 (examinador externo)


 Dr. Antonio Luiz Pereira de
 Siqueira Campos

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Laércio Martins de Mendonça e ao Prof. Adaildo Gomes d'Assunção pela orientação e sugestões.

Ao Prof. José Alfredo Ferreira Costa e ao Eng. Wellington Candeia de Araújo pela ajuda em redes neurais.

Ao Eng. Manuel Jonas Fonseca Barbalho e ao técnico Moisés Santos da Silva pela ajuda em programação e digitalização de relevo.

À minha esposa Lena, e meus filhos Reno, Igor e Kiev pela paciência.

RESUMO

Nesta tese novos modelos de predição de perda de percurso de propagação são propostos a partir de técnicas de otimizações recentes e de medições de níveis de potências obtidas para as áreas urbana e suburbana de Natal, cidade do Nordeste Brasileiro.

Estes novos modelos são: (i) um modelo estatístico que foi implementado baseado na adição de estatísticas de 2a. ordem para a potência e a altimetria do relevo ao modelo de perdas lineares; (ii) um modelo com redes neurais artificiais que usou o treinamento do algoritmo *backpropagation*, a fim de obter a equação de perdas de propagação; (iii) um modelo baseado na técnica dos trajetos aleatórios, que considera a aleatoriedade da absorção e do caos do meio ambiente e que seus parâmetros desconhecidos para a equação de perdas de propagação são determinados através de uma rede neural.

A digitalização do relevo das áreas urbanas e suburbanas de Natal foi realizada através do desenvolvimento de programas computacionais específicos e foram usados os mapas existentes no Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

As validações dos modelos propostos de predição de perda de propagação foram realizadas através de comparações com medidas e modelos clássicos de propagação, obtendo-se boas concordâncias numéricas. Estes novos modelos poderão ser aplicados a qualquer cenário urbano e suburbano com características arquitetônicas semelhantes à cidade de Natal.

Palavras-chaves: modelos de predição de propagação; ambientes urbanos e suburbanos; modelo estatístico; modelo de rede neural; modelo do trajeto aleatório; medições em campo.

ABSTRACT

In this dissertation new models of propagation path loss predictions are proposed by from techniques of optimization recent and measures of power levels for the urban and suburban areas of Natal, city of Brazilian northeast.

These new proposed models are: (i) a statistical model that was implemented based in the addition of second-order statistics for the power and the altimetry of the relief in model of linear losses; (ii) a artificial neural networks model used the training of the algorithm backpropagation, in order to get the equation of propagation losses; (iii) a model based on the technique of the random walker, that considers the random of the absorption and the chaos of the environment and than its unknown parameters for the equation of propagation losses are determined through of a neural network.

The digitalization of the relief for the urban and suburban areas of Natal were carried through of the development of specific computational programs and had been used available maps in the Statistics and Geography Brazilian Institute.

The validations of the proposed propagation models had been carried through comparisons with measures and propagation classic models, and numerical good agreements were observed. These new considered models could be applied to any urban and suburban scenes with characteristic similar architectural to the city of Natal.

Key words: propagation prediction models; urban and suburban environments; statistical model; neural network model; random walker model; field measures.

ÍNDICE

Capítulo 1 - Introdução	1
1.1 - Motivação e justificativa do trabalho	1
1.2 - Estrutura da tese	3
Capítulo 2 - Características gerais do sistema de comunicações móveis	4
2.1 - Propagação de ondas no espaço livre	4
2.2 - Perdas de transmissão no espaço livre	5
2.3 - Região de campo distante	6
2.4 - Alocação de frequências para comunicações móveis	7
2.5 - Intensidade de campo elétrico na recepção	8
Capítulo 3 - Modelos de propagação em sistemas de rádio móvel	10
3.1 - Introdução	10
3.2 - O Modelo de propagação de perdas lineares	10
3.3 - O Modelo de Okumura	11
3.4 - O Modelo de Hata	13
3.5 - O Modelo de Egli	14
3.6 - O Modelo de Blonquist-Ladell	15
3.7 - O Modelo Cost 231 - Hata	15
3.8 - O Modelo Cost 231 - Walfish-Ikegami	16
3.9 - O Modelo dos trajetos aleatórios em propagação	19
3.10 - Modelo Estatístico de predição para ambientes urbanos	22
3.11 - Resultados numéricos	29
3.12 - Medidas de campo para obtenção de perdas de propagação em comunicações móveis	44
3.13 - Conclusão	48
Capítulo 4 - Técnicas de digitalização de relevo	49
4.1 - Considerações gerais	49
4.2 - Dados digitais de elevação do terreno	51
4.3 - DTED empregado	53
4.4 - A estrutura do diretório e do sub-diretório	55
4.5 - Levantamento topográfico e digitalização do relevo	57
4.6 - Procedimentos para preenchimento do banco de dados	59
4.7 - Mapeamento	59
4.8 - Variáveis regionalizadas	64

4.9 - Uso das redes neurais	65
4.10 - Conclusão	65
Capítulo 5 - Redes neurais artificiais: características e aplicações em modelos de predição de propagação em ondas de rádio	66
5.1 - Introdução às redes neurais artificiais (RNAs)	66
5.2 - Breve histórico das RNAs	67
5.3 - Modelo matemático de um neurônio artificial	68
5.4 - Redes neurais em camadas progressivas (feedforward multilayer perceptrons - FMLP)	69
5.5 - Procedimento computacional para o algoritmo <i>backpropagation</i>	70
5.6 - As condições iniciais	71
5.7 - Conclusão	82
Capítulo 6 - Modelo de predição de perda de propagação em ambiente urbano usando redes neurais artificiais	83
6.1 - Predição do campo elétrico	83
6.2 - Características de transmissão e recepção	86
6.3 - Conclusão	90
Capítulo 7 - Conclusões	91
Apêndice A Resumo das medições	93
Apêndice B Características do Sistema Irradiante	112
Apêndice C O Uso da Rede Neural	118
C - 1 - Ajuste do erro obtido	124
C - 2 - Conclusão	125
Apêndice D Estatística de 1 ^a . e 2 ^a . ordens	126
D -1- Medidas de dispersão	126
D -2- A importância da distribuição de probabilidade nos modelos de propagação de ondas de rádio	129
Referências bibliográficas	132

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 2

- Figura 2.1 - Ilustração de um sistema de comunicações móveis convencionais e celulares. 5

Capítulo 3

- Figura 3.1 - O fator de rugosidade Δh . 12
- Figura 3.2 - Cenário para o modelo Cost 231 – Walfish-Ikegami 17
- Figura 3.3 - Orientação de rua com relação ao móvel (Cost 231 – Walfish-Ikegami) 17
- Figura 3.4 - Histograma e curva da fdp da potência recebida. 23
- Figura 3.5 - Histograma, curva da fdp e curva de ajuste (polinômio de 5^a. ordem) 24
- Figura 3.6 - Histograma e curva da fdp das variações das altitudes. 26
- Figura 3.7 - Histograma e curvas da fdp das altitudes e de ajuste (polinômio de 5^a. ordem) 27
- Figura 3.8 - Comparação de modelos de predição empregados 29
- Figura 3.9 - Função densidade de probabilidade da potencia recebida. 30
- Figura 3.10 - Histograma e curva da fdp e sua curva de ajuste (polinômio do 5^o. grau) da potência recebida 31
- Figura 3.11 - Função densidade de probabilidade das altitudes 32
- Figura 3.12 - Curva da fdp relativa a altitude e sua curva de ajuste (polinômio do 5^o. grau) 33
- Figura 3.13 - Comparação de modelos de predição de propagação empregados 34
- Figura 3.14 - Função densidade de probabilidade da potencia recebida 35
- Figura 3.15 - Curvas da FDP e sua curva de ajuste para um polinômio de 5^a. ordem, referentes a potência recebida. 36
- Figura 3.16 - Função densidade de probabilidade referente à altitude 37
- Figura 3.17 - Curvas da fdp e sua curva de ajuste para um polinômio de 5^a. ordem, referentes a altitude 37
- Figura 3.18 - Comparação de desempenho de modelos de predição usados 38
- Figura 3.19 - Função densidade de probabilidade da potencia recebida 40
- Figura 3.20 - Curvas da fdp e sua curva de ajuste para um polinômio de 5^a. ordem referentes à potência 40
- Figura 3.21 - Função densidade de probabilidade das altitudes 41
- Figura 3.22 - Curvas da fdp e sua curva de ajuste para um polinômio de 5^a. ordem referentes à altitude 42
- Figura 3.23 - Comparação de modelos de propagação empregados 43
- Figura 3.24 - Pontos da medição Geral e a medição por zonas: Norte; Sul e Oeste. 45
- Figura 3.25 - Expoente de perda de propagação para Geral Natal. 46

Figura 3.26 - Expoente de perda de propagação para Norte Natal	46
Figura 3.27 - Expoente de perda de propagação para Oeste Natal.	47
Figura 3.28 - Expoente de perda de propagação para Sul Natal.	47
 Capítulo 4	
Figura 4.1 - Ilustração de uma matriz de 1201 x 1201 pontos correspondendo a 1° por 1° com início de varredura pelo sudoeste e na coluna na direção Norte.	54
Figura 4.2 - A quadrícula de 1° X 1°	56
Figura 4.3 - Curva de nível e pontos relevantes em amostra de mapa em escala de 1:100.000	57
Figura 4.4 - Exemplo de curvas de nível, pontos relevantes e pontos para preenchimento	58
Figura 4.5 - Quadrículas do Rio Grande do Norte para digitalização do relevo no formato DTED	60
Figura 4.6 - Mapa de relevo para Natal-RN	61
Figura 4.7 - Exemplo de área de cobertura a partir de um ponto de emissão baseado no relevo no padrão DTED LEVEL 1 centrado em Natal-RN.	62
Figura 4.8 - Exemplo de área de cobertura em função do nível de potência recebido em função de banco de dados digitalizado no formato DTED LEVEL 1 centrado em Natal- RN	63
 Capítulo 5	
Figura 5.1 - Diagrama de blocos de um neurônio artificial	68
Figura 5.2 - Rede FMLP, com arquitetura 4-2-1	70
Figura 5.3 - Diagrama de blocos de entrada e saída de dados da RNA.	74
Figura 5.4 - Variação do campo com a distância	81
 Capítulo 6	
Figura 6.1 - Diagrama de bloco para cálculo de campo para as rotas 1 e 2	85
Figura 6.2 - Rota 1 e 2 e campanha de medições para as áreas urbanas e suburbanas da cidade de Natal	87
Figura 6.3 - Potência versus distância – Rota 1	88
Figura 6.4 - Potência versus distância – Rota 2	89
 Apêndice B	
Figura B.1 - Características da antena	113
Figura B.2 - Curva de resposta em frequência (medida)	114
Figura B.3 - VSWR na frequência de serviço (dado do fabricante)	115
Figura B.4 - Impedância medida (carta de Smith)	116

Figura B.5 - Impedância medida (diagrama polar)	117
Apêndice C	
Figura C.1 - Diagrama de bloco de um neurônio artificial	118
Apêndice D	
Figura D.1 - Curva da distribuição normal	128

LISTA DE TABELAS

Capítulo 2

Tabela 2.1	Freqüência utilizadas pelas diversas bandas de comunicações móveis.	8
------------	---	---

Capítulo 3

Tabela 3.1	Predições do modelo de predição de propagação por trajetos aleatórios em função de γ e η	21
Tabela 3.2	Valores assintóticos e estatísticos da curva da Figura 3.5.	24
Tabela 3.3	Valores assintóticos e estatísticos da curva da Figura 3.7.	27
Tabela 3.4	Resultados - Geral Natal	29
Tabela 3.5	Valores assintóticos e estatísticos da curva de ajuste da fdp da Figura 3.10	32
Tabela 3.6	Valores assintóticos e estatísticos da curva de ajuste da fdp para a Figura 3.12 e referente à altitude	33
Tabela 3.7	Resultados - Oeste Natal	34
Tabela 3.8	Valores assintóticos e estatísticos da curva de ajuste para a Figura 3.15	36
Tabela 3.9	Valores assintóticos e estatísticos da curva de ajuste para a da Figura 3.17	38
Tabela 3.10	Resultados - Sul Natal	39
Tabela 3.11	Valores assintóticos e estatísticos da curva de ajuste da fdp para a Figura 3.20	41
Tabela 3.12	Valores da curva de ajuste da fdp para a Figura 3.22.	42
Tabela 3.13	Resultados - Norte Natal.	43

Capítulo 4

Tabela 4.1	Características dos vários DTEDs	52
Tabela 4.2	Espaçamento e pontos dos DTEDs	52
Tabela 4.3	Espaçamento de tamanho de quadrícula dos DTEDs	53
Tabela 4.4	Arquivos em <i>bytes</i> do DTED em função das latitudes	54

Capítulo 5

Tabela 5.1	Dados do terreno para radiais de 1 Km, com altitudes em metros, com valores de campo medido em dBmW	75
Tabela 5.2	Dados do terreno para radiais de 5 Km, com altitudes em metros, com valores de campo medido em dBmW	76
Tabela 5.3	Dados do terreno para radiais de 10 Km, com altitudes em metros, com valores de campo medido em dBmW	77
Tabela 5.4	Dados do terreno para radiais de 1 km, com altitudes em metros, com valores de campo medido em dBmW a ser determinado pela rede neural	78
Tabela 5.5	Dados do terreno para radiais de 5 Km, com altitudes em metros, com valores de campo em dBmW a ser determinado pela rede neural	79
Tabela 5.6	Dados do terreno para radiais de 10 Km, com altitudes em metros, com valores de campo em dBmW a ser determinado pela rede neural	80
Tabela 5.7	Cálculo da potência por métodos distintos.	82
Tabela 5.8	Resultados	82

Apêndice A

Tabela A-1 -	Ponto e potências medidas - rota 1	94-99
Tabela A-2 -	Ponto e potências medidas - rota 2	100-105
Tabela A-3 -	Medição de potências nos pontos	106-111

Apêndice C

Tabela C-1 -	Dados do terreno para radiais de 1 Km, com altitudes em metros, com valores de campo medido em dBmW.	120
Tabela C-2 -	Dados do terreno para radiais de 1 Km, com altitudes em metros, com valores de campo medido em dBmW a ser determinado pela rede neural.	120
Tabela C-3 -	Valores de campo em dBmW estimados pela rede neural para as radiais de 1 a 10, com média Geral apresentada para cada radial e com “n” variando de 5 a 50.	121
Tabela C-4 -	Cálculo de campos, erros e épocas em simulação 1.	121
Tabela C-5 -	Cálculo de campos, erros e épocas em simulação 2.	122
Tabela C-6 -	Cálculo de campos, erros e épocas em simulação 3.	122
Tabela C-7 -	Cálculo de campos, erros e épocas e tempo em simulação 4.	123
Tabela C-8 -	Cálculo de campos, erros e épocas em simulação 5.	123
Tabela C-9 -	Cálculo de campos, erros (ordem de EE-07) e tempo.	124
Tabela C-10 -	Cálculo de campos, erros (ordem de EE-04) e tempo.	125

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A_e	Área efetiva de uma antena
CCC	Central de comando e controle
l	Comprimento da antena
λ	Comprimento de onda
σ	Condutividade elétrica complexa
DTED	Dados digitalizados de elevação de relevo
DM	Desvio médio
σ_p	Desvio padrão
d	Diâmetro ou dimensão da antena
r, R	Distância do elemento de referência ao observador
Y	Distribuição normal
E_j	Erro absoluto
\bar{E}	Erro médio absoluto
ERB	Estação de rádio-base
η	Estimativa da densidade de obstáculos no modelo dos trajetos aleatórios
γ	Expoente de perda de propagação no espaço livre; probabilidade de um fóton ser absorvido por um obstáculo
F	Faixas de medição
α	Fator de correção
Δh	Fator de rugosidade
f	Frequência
f_{dp}	Função densidade de probabilidade
G_r	Ganho da antena receptora
G_t	Ganho da antena transmissora
Z_0	Impedância intrínseca do ar
E	Intensidade de campo elétrico
μ	Média
\bar{X}	Média aritmética das variáveis X_j
N	Número de medidas obtidas

A_{fs}, L_f	Perda na propagação no espaço livre
P_0	Potência recebida por uma estação móvel
P_{ERP}	Potência efetivamente irradiada
P_t, P_1	Potência radiada
P_r	Potência transmitida
X	Probabilidade
$R.M.Q.$	Raiz média quadrática
V	Tensão induzida
X_j	Variáveis
γ, y	Variável em ambiente móvel
c	Velocidade da luz
S_r	Vetor de Poynting

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Motivação e justificativa do trabalho

A principal justificativa para se realizar uma predição de perda de percurso de propagação de ondas de rádio ou predição de cobertura é minimizar o custo de planejamento e a implementação de sistemas de comunicações sem fio, fixo ou móvel. Ao se fazer predições de coberturas confiáveis, diminui-se consideravelmente o número de medições a serem realizadas no cenário de interesse, implicando também numa diminuição de tempo e custo do projeto.

O trabalho relatado nesta tese tem como objetivo contribuir para uma melhor compreensão física da propagação de ondas de rádio em ambientes urbanos e, ao mesmo tempo, apresentar os desenvolvimentos e as implementações de modelos melhorados de predição de perda de propagação para tais ambientes. Os cenários escolhidos para esse trabalho foram as áreas urbanas e suburbanas da cidade de Natal, no Nordeste Brasileiro. Para os procedimentos experimentais em campo foram realizadas campanhas de medições nas áreas consideradas e programas computacionais foram desenvolvidos para as digitalizações do relevo. Os modelos de predição de perda de propagação propostos foram os seguintes: (i) um modelo estatístico resultante da adição ao modelo de perdas lineares, de estatísticas de 2ª. ordens dos desvios padrões das funções densidades de probabilidades para os níveis de potência e altitude do relevo em função da distância entre a estação base e a unidade móvel, obtidos de medidas de campo; (ii) um modelo baseado em técnicas de redes neurais artificiais, no qual foi empregado o algoritmo *backpropagation* no treinamento da rede, a partir de dados obtidos de medições de campo; (iii) um modelo baseado no método dos trajetos aleatórios, cujo fundamento é o caos e

desordem do ambiente, para a determinação da equação de perdas de propagação. A validação desses modelos foi realizada a partir de comparações com banco de dados de medidas realizadas e com modelos de propagação tradicionais. Para uma melhor compreensão dos modelos propostos e as técnicas de medição, recomenda-se a leitura das referências [1]-[6]. Os modelos de predição de perda de propagação ou cobertura de ondas de rádio vêm sendo estudados há bastante tempo, fornecendo diversos modelos de propagação, que podem ser classificados como modelos de simulações e modelos de predição [7]-[18].

Os modelos de simulações são os modelos empíricos e semi-empíricos, e têm sido empregados tradicionalmente para as comunicações em ambientes rurais e urbanos [7]-[11]. Para esses modelos, dados específicos de cada ambiente são considerados somente de forma estatística (altura média dos edifícios, largura média das ruas, etc.). Além disso, inúmeras medições são feitas para se caracterizar melhor o ambiente. Dessa forma, consegue-se desenvolver um modelo estatístico com base nos dados medidos. Este procedimento é muito útil e se consegue fazer predições razoavelmente boas, especialmente quando as antenas transmissoras estão localizadas em pontos elevados em relação ao cenário do ambiente analisado. Entretanto, os modelos de simulações possuem limitações, como, por exemplo, somente funcionar para um ambiente específico ou similar, ou seja, para outros ambientes outras medições precisam ser realizadas para os devidos ajustes.

Os modelos de predição apresentam resultados também satisfatórios, sem a necessidade de muitas medições locais para o ajuste do modelo [15]-[16]. Isso é feito através de uma descrição do ambiente como dado de entrada para o modelo. Em conjunto com base de dados digitalizados de perfis de terrenos se consegue construir um modelo analítico que avalia as características de propagação. Dentre estes modelos, podem-se citar as técnicas assintóticas da Óptica Geométrica e a da Técnica Uniforme da Difração [17] e os métodos numéricos baseados em equações integrais [18]. Estes modelos conseguem resolver problemas eletromagnéticos para altas frequências, para os quais a solução exata das equações de Maxwell como problemas de valor de contorno são pouco práticas.

1.2 Estrutura da Tese

Nesta tese são propostos novos modelos de predição de perda de propagação para ambientes urbanos e suburbanos da cidade de Natal, além de técnicas de medição e digitalização do relevo das áreas consideradas.

No Capítulo 2, são apresentadas as características gerais de propagação de ondas eletromagnéticas. Os principais modelos e procedimentos para cálculo de campos numa comunicação sem fio, fixa ou móvel, são analisados no Capítulo 3. No Capítulo 4, são estudadas as principais técnicas e procedimentos para a digitalização do relevo. São analisadas no Capítulo 5 as características de redes neurais para aplicações na predição da perda de propagação obtidas a partir de valores coletados em campanha de medição. Estes resultados são comparados com os valores obtidos com as ferramentas de predição de RF relacionadas à digitalização do relevo. No Capítulo 6 empregou-se uma rede neural para previsão de campo e perda de percurso para outra campanha de medições e comparações foram realizadas com a teoria dos trajetos aleatórios. As conclusões são apresentadas no Capítulo 7. No Apêndice **A** são mostradas um resumo das medições; no Apêndice **B** tem-se as características do sistema irradiante usado; no Apêndice **C** analisam-se os dados intrínsecos inerentes às redes neurais e no Apêndice **D** é mostrado a formulação estatística empregada.

As principais contribuições deste trabalho foram as seguintes:

- Proposta de um modelo estatístico de perdas de propagação com utilização de parâmetros estatísticos do relevo do terreno e da potência recebida, bem como a introdução de uma função aleatória (*rand*) para ajuste do modelo;
- Emprego e aprimoramento da Técnica de Digitalização (DTED) na aquisição dos dados digitais da área urbana da cidade do Natal – RN e de toda a região Nordeste do Brasil;
- Aplicação de redes neurais artificiais e do modelo dos trajetos aleatórios no desenvolvimento de modelos de predição de perda de propagação para sistemas de comunicações sem fio para a área urbana considerada.

CAPÍTULO 2

CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS SISTEMAS DE COMUNICAÇÕES MÓVEIS

2.1 – Propagação de Ondas no Espaço Livre

A atenuação sofrida por um sinal de radiofrequência (RF) que se propaga entre as antenas de um transmissor e de um receptor, fixa ou móvel, é um fator importante para o cálculo do desempenho de sistemas de comunicações sem fios [19]-[23]. Para a propagação de ondas eletromagnéticas em meios naturais, certamente a que ocorre no espaço livre é a mais simples, comparando-se com outros meios por existir uma grande diversidade de parâmetros a serem considerados.

A proximidade da terra e os efeitos dela decorrentes devem ser levados em conta em uma análise precisa da propagação em sistemas de comunicação sem fio [18], [19]. A utilização de antenas direcionais também deve ser considerada, pois afeta as características de desempenho do sistema, a partir da inclusão dos ganhos das antenas transmissora e receptora.

Em relação à análise das medidas em campo dos níveis dos sinais, sabemos da teoria de antenas [23], que os resultados medidos somente podem ser considerados se estiverem na região de campo distante da mesma, denominada de região de Fraunhofer, e não na região de campo próximo, conhecida como região de Fresnel.

Existem basicamente dois tipos de comunicações móveis terrestres: primeiro tipo ou sistema tradicional, onde as estações móveis (portáteis ou veiculares) se deslocam ao redor de uma estação fixa, com características principais de baixa densidade de usuários, não reutilização de frequências, alta potência de transmissão, antenas elevadas, grande área de cobertura e sem expansão modular; segundo tipo ou sistema celular, onde estações móveis deslocam-se através de várias estações fixas, estações de rádio base – ERB com características de alta densidade de usuários, utilização de reuso de frequências, emprego de baixa

potência de transmissão, antenas pouco elevadas, área de cobertura em pequenas células e grande expansão modular, conforme ilustrado na Figura 2.1 [13].

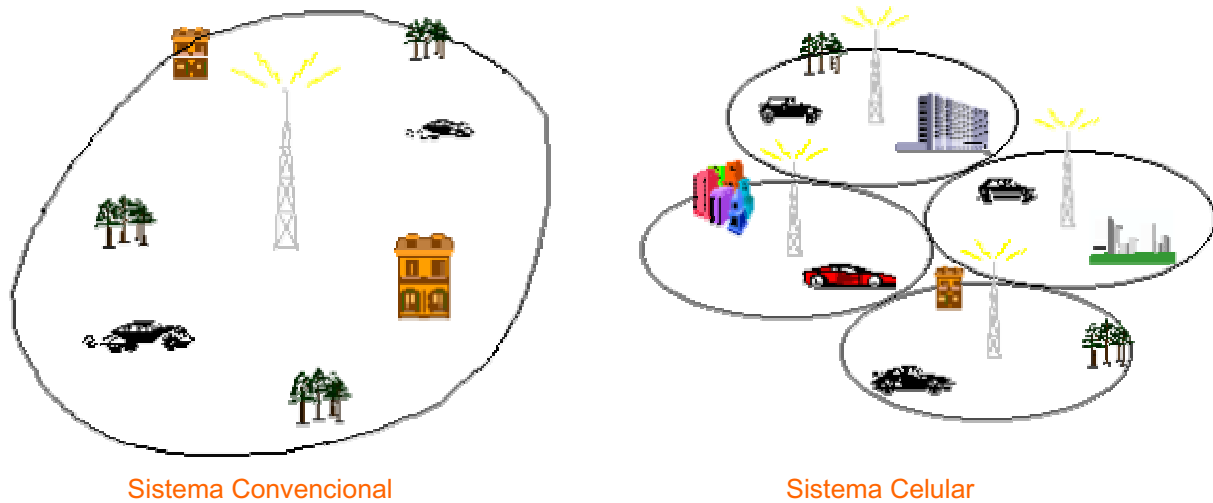


Figura 2.1 – Ilustração de sistemas de comunicações móveis convencionais e celulares.

Na análise das ondas eletromagnéticas em comunicações móveis, a propagação pode se processar basicamente em visada direta com fenômenos de reflexões, refrações, espalhamentos, etc., e também pela troposfera [13], [25]. É evidente que quanto maior a frequência usada maior será a perda de propagação e menor o nível do sinal na recepção, tanto para a estação móvel (EM) como para a estação de rádio base (ERB).

2.2– Perdas de Transmissão no Espaço Livre

Considere um ponto do espaço no qual esteja localizada uma antena transmissora isotrópica, radiando uma potência P_t . Na região de campo distante desta antena, a potência radiada se distribui uniformemente em uma superfície esférica de raio r , com $r \gg \lambda$, sendo λ o comprimento de onda do sinal radiado. Desprezando-se as perdas na antena transmissora, a densidade de potência, S_r , a uma distância r é obtida como [15], [19], [23]

$$S_r = \frac{P_t}{4\pi r^2} \quad (2.1)$$

Por outro lado, a uma distância r da antena transmissora, a potência recebida é proporcional à área efetiva da antena receptora, A_e , que é dada por [15], [19], [23].

$$A_e = \frac{G_r \lambda^2}{4\pi} \quad (2.2)$$

sendo G_r o ganho da antena receptora.

Das equações (2.1) e (2.2), obtém-se a expressão para a potência recebida como

$$P_r = S_r A_e = \frac{P_t}{4\pi r^2} \frac{G_r \lambda^2}{4\pi} \quad (2.3)$$

Considerando-se uma antena transmissora direcional, com um ganho G_t , em substituição à antena isotrópica inicial, a expressão para a potência recebida, P_r , a uma distância r dessa antena, obtida da equação (2.3), passa a ser escrita como [15], [19], [23].

$$P_r = P_t G_r G_t \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \quad (2.4)$$

Define-se a perda de percurso no espaço livre (com $G_r = G_t = 1$) como sendo

$$A_{fs} = \frac{P_t}{P_r} = \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2 = \left(\frac{4\pi r f}{c} \right)^2 \quad (2.5)$$

onde c é a velocidade da luz e f é a frequência do sinal.

2.3 – Região de Campo Distante

As equações obtidas na seção anterior não se aplicam à região de campo próximo, definida como sendo aquela para a qual tem-se $r > \lambda$. A região de radiação de campo próximo, também conhecida como a região de Fresnel, não será considerada neste estudo, mas apenas a região de campo distante, denominada como região de Fraunhofer [23].

A região de campo distante é definida como sendo aquela para a qual tem-se:

$$r \geq \frac{2d^2}{\lambda} \quad (2.6)$$

sendo d a maior dimensão da antena transmissora, que pode corresponder, por exemplo, ao diâmetro da seção transversal de uma antena parabólica, ou ao comprimento de um dipolo elétrico de uma ERB, usada em sistemas de comunicações móveis. Assim, a definição de d , que geralmente está associada ao comprimento de onda, λ , vai depender essencialmente do tipo de antena considerado.

Exemplificando, pode-se verificar que para uma frequência de transmissão de 890 MHz ($\lambda = 0,337\text{m}$), usada no enlace de uma ERB para uma EM, em que $d = 1 \text{ m}$, a região de campo distante é determinada como sendo aquela para a qual $r \geq 5,93 \text{ m}$.

2.4 – Alocação de Frequências para Comunicações Móveis

A Tabela 2.1 apresentada a seguir, mostra os valores de frequências utilizados pelas diversas bandas de operação [24]. Neste trabalho será usada apenas as bandas A e B.

Tabela 2.1 – Frequências utilizadas pelas diversas bandas de comunicações móveis

BANDA A	
Transmissão da Estação Móvel	824 MHz a 835 MHz 845 MHz a 846,5 MHz 1900 MHz a 1905 MHz
Transmissão da Estação Radio-base	869 MHz a 880 MHz 890 MHz a 891,5 MHz 1980 MHz a 1985 MHz
BANDA B	
Transmissão da Estação Móvel	835 MHz a 845 MHz 846,5 MHz a 849 MHz 1905 MHz a 1910 MHz
Transmissão da Estação Radiobase	880 MHz a 890 MHz 891,5 MHz a 894 MHz 1985 MHz a 1990 MHz
Banda C	
Transmissão da Estação Móvel	1725 MHz a 1740 MHz
Transmissão da Estação Radiobase	1820 MHz a 1835 MHz
Banda D	
Transmissão da Estação Móvel	1710 MHz a 1725 MHz
Transmissão da Estação Radiobase	1805 MHz a 1820 MHz
Banda E	
Transmissão da Estação Móvel	1740 MHz a 1755 MHz
Transmissão da Estação Radiobase	1835 MHz a 1850 MHz

2.5 – Intensidade de Campo na Recepção

Em sistemas de comunicações sem fios existem vários modelos empíricos e semi-empíricos para o cálculo da intensidade de campo elétrico em um determinado ponto do espaço [26], [27]. Alguns destes modelos foram desenvolvidos para a análise da propagação em ambientes móveis.

Considere a propagação de uma onda eletromagnética plana radiada por uma antena transmissora localizada no espaço livre. A densidade de potência média, S_r , é dada como

$$S_r = E^2/Z_0 \quad (2.7)$$

Em que E é a intensidade do campo elétrico e Z_0 é a impedância intrínseca no espaço livre ($Z_0 = 377 \Omega$).

A abertura efetiva máxima de um dipolo linear de meio comprimento de onda ($l = \lambda/2$), com distribuição de corrente senoidal [25], é igual a 0,13 da raiz quadrada do comprimento de onda (λ). No sistema *MKSA*, a potência incidente em um determinado ponto da região do campo distante, em função da intensidade de campo elétrico e da frequência, pode ser expressa como

$$P (W) = \left(\frac{E^2}{377}\right) \cdot (0,13) \cdot \left(\frac{300}{f_{MHz}}\right)^2 \quad (2.8)$$

ou em unidades dBm como

$$P (dBm) = 20 \log (E) - 75 - 20 \log f \quad (2.9)$$

sendo E dado em $\mu V/m$ e f em MHz.

Na recepção, se for usado um monopolo, ou um dipolo, a tensão induzida, V , pode ser relacionada com a intensidade de campo elétrico incidente, E , através da expressão seguinte:

$$V = \frac{E\lambda}{\pi} \quad (2.10)$$

CAPÍTULO 3

MODELOS DE PROPAGAÇÃO EM SISTEMAS DE RÁDIO MÓVEL

3.1 – Introdução

Em se tratando de propagação de ondas em meios naturais, não existe um modelo exato que represente o comportamento da onda, com previsão precisa dos seus parâmetros principais em determinados pontos. Para isto, adotaram-se os modelos de propagação que tem por objetivo determinar resultados bem próximos do real. Esta modelagem quanto mais se aproximar da representação adequada do ambiente físico real, melhor serão os resultados obtidos e a confiabilidade na robustez do modelo. Diversas ferramentas de predição de RF utilizam-se destes modelos para determinação dos campos, potências e área de cobertura [30]-[33].

O modelo mais comumente empregado é o modelo de propagação no espaço livre. É o mais geral, pois considera simplesmente que a perda na propagação varia com o inverso do quadrado da distância, sendo considerado um modelo de referência para o desenvolvimento de outros modelos existentes [8], [16], [20].

3.2 – O Modelo de Propagação de Perdas Lineares

Este modelo de propagação de perdas lineares é empregado em muitos programas de predição para o cálculo de níveis de sinal em pontos variados da área de cobertura de um sistema celular [13], [15].

Neste modelo de perdas lineares, atribuem-se índices de rugosidade específicos que dependem das condições de propagação em cada ambiente.

O nível de potência do sinal recebido pela estação móvel, P_r , localizada a uma distância r da ERB, pode ser dada como

$$P_r = P_0 - 10 \log \left(\frac{r}{r_0} \right)^\gamma \quad (3.1)$$

onde P_0 é a potência em dBm do sinal recebido pela EM, proveniente de uma ERB à qual está associada; r_0 é a distância de referência em relação a ERB, e γ é o expoente de perda de propagação [13], [15]. Os valores de γ e P_0 podem ser determinados através de medidas de sinal realizadas na área de cobertura da célula.

3.3 – O Modelo de Okumura

Com a expansão da demanda nas comunicações móveis celulares se tornou necessário o desenvolvimento de novos modelos de perdas de propagação cada vez mais robustos, para a predição do campo e da potência em qualquer ponto da área de cobertura da célula. Nos trabalhos de Okumura [34], as primeiras técnicas de medições de campo foram realizadas para obtenção desses novos modelos de predição. Esses trabalhos foram realizados na cidade de Tóquio e os resultados obtidos foram usados na obtenção de modelos gráficos de predição. Os procedimentos consistiram em medições radiais, onde a terra foi considerada quase plana, com fator de rugosidade (Δh) aproximadamente igual a 20 metros.

Na obtenção das expressões matemáticas do modelo foram usados alguns fatores de correção. As correções básicas são as seguintes: (1^{a.}) atenuação adicional, que é função da frequência e da distância; (2^{a.}) tipo de ambiente (aberto, quase aberto, suburbano); (3^{a.}) altura da antena receptora; (4^{a.}) altura da antena transmissora. O modelo de Okumura é essencialmente experimental e válido para frequências variando de 100 MHz a 3 GHz (com restrições a partir de 1900 MHz) e distâncias de 1 Km a 100 Km.

A predição da perda de propagação média é dada como

$$L_{\text{média}} \text{ (dB)} = L_{\text{bf}} + A(f, d) - G_{\text{ÁREA}} - G_T(\text{ht}, d) - G_R(\text{hr}, d) \quad (3.2)$$

onde

- $L_{\text{média}}(\text{dB})$ é o valor médio da perda de propagação;
- L_{bf} é a perda de propagação no espaço livre;
- $A(f, d)$ é a atenuação adicional para áreas urbanas;

- $G_T(h_t, d)$ e $G_R(h_r, d)$ são os ganhos devido à altura das antenas de recepção e de transmissão;
- $G_{\text{ÁREA}}$ é o fator de correção de frequência associada ao terreno;

As expressões para o termo $G(h_t)$ são dadas como

$$G_T(h_t, d) = 20 \log (h_t / 200), \text{ para } 1000\text{m} > h_t > 10\text{m} \quad (3.3)$$

$$G_R(h_r, d) = 10 \log (h_r / 3), \text{ para } h_r < 3\text{m} \quad (3.4)$$

$$G_R(h_r, d) = 20 \log (h_r / 3), \text{ para } 10\text{m} > h_r > 3\text{m} \quad (3.5)$$

A Equação (3.2) é empregada para um padrão típico de transmissão/recepção. Caso este padrão seja alterado faz-se a correção através das curvas. O padrão adotado é para altura da antena transmissora (h_t) = 200m e a altura da receptora (h_r) = 3m. Deve-se observar que este modelo avalia as perdas e nunca os campos e potências transmitidos/recebidos.

O fator de rugosidade Δh de cada radial tomada (que pode ser expandido para um grupo de radiais) é definido como sendo a diferença entre as altitudes excedidas em 10% e 90 % do trajeto de propagação, compreendidos entre as distâncias consideradas.

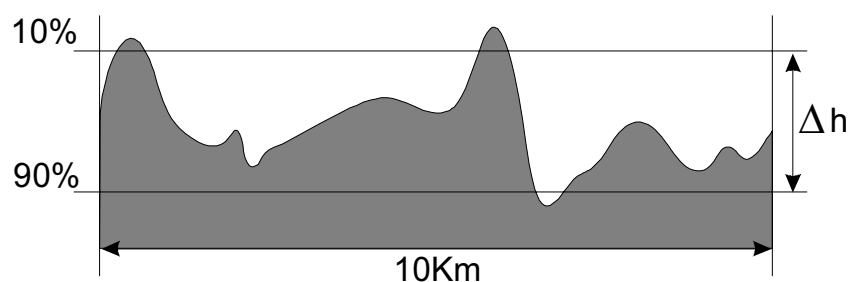


Figura 3.1 – O fator de rugosidade Δh .

Para alguns autores são consideradas as distâncias dos primeiros 10 Km, e para outros as distâncias entre 10Km e 50 Km. Em comunicações com alcances maiores como VHF, a segunda situação é aplicada; em comunicações celulares (UHF e SHF) a primeira situação é aplicada devido às pequenas distâncias envolvidas em função da cobertura da ERB.

O fator de rugosidade de um terreno pode ser avaliado como sendo a média do fator de rugosidade das radiais consideradas. Experimentalmente, oito radiais são suficientes para a área de cobertura do sistema de comunicação sem fio. Entretanto, empregando-se o relevo digitalizado, pode-se obter até 360 radiais, tomando-se valores de 1° em 1°. Verifica-se que quanto menor for o Δh mais plano será a área de cobertura. Para casos extremos de Δh , estes valores poderão apresentar erros significativos na predição das perdas, como: (a) radiais que estejam sobre a água; (b) o perfil que apresente vales profundos entre o transmissor e o receptor; (c) o perfil que apresente obstáculos isolados; (d) irregularidades significativas; (e) a linha de visada entre o transmissor e o receptor se distancie substancialmente do horizonte; (f) radial que apresente $\Delta h > 150\text{m}$; (g) radial que apresente diferença superior ou igual a 100m entre cotas de seus maiores obstáculos.

3.4 – O Modelo de Hata

O modelo de Okumura é essencialmente gráfico e de difícil implementação computacional. Hata [35] teve a idéia de sintetizar todas as informações em equações. Daí o modelo chamado por alguns de modelo de Hata e por outros de modelo de Okumura-Hata.

Para este modelo, a expressão para a perda de propagação em áreas urbanas é dada como:

$$L \text{ (dB)} = 69,55 + 26,16\log(f) - 13,82\log(h_T) - a(h_R) + [44,9 - 6,55 \log(h_T)] \log(d) \quad (3.6)$$

onde f é a frequência em MHz; d é a distancia em Km, e , h_T e h_R , as alturas das antenas transmissora e receptora, respectivamente, dadas em metros. O parâmetro $a(h_R)$ de (3.6) é definido em função do tipo de ambiente. Portanto, tem-se as seguintes expressões para $a(h_R)$:

- Cidades pequenas e médias:

$$a(h_R) = [1,1 \log(f) - 0,7]h_R - [1,56 \log(f) - 0,8] \text{ dB} \quad (3.7)$$

- Para cidades grandes:

$$a(h_R) = 8,29(\log 1,54h_R)^2 - 1,1 \text{ dB} \quad \text{para } f \leq 300 \text{ MHz} \quad (3.8)$$

$$a(h_R) = 3,2(\log 11,75h_R)^2 - 4,97 \text{ dB} \quad \text{para } f \geq 300 \text{ MHz} \quad (3.9)$$

- Para áreas suburbanas:

$$L(\text{dB}) = L_{\text{URBANA}} - 2\left[\log\left(\frac{f}{28}\right)\right]^2 - 5,4 \text{ dB} \quad (3.10)$$

sendo f a frequência em MHz e L_{URBANA} o parâmetro obtido através da equação (3.6).

- Para áreas abertas

$$L(\text{dB}) = L_{\text{URBANA}} - 4,78(\log f)^2 + 18,33(\log f) - 40,94 \quad (3.11)$$

3.5 – O Modelo de Egli

O modelo de Egli [19], é válido somente para frequências até 900 MHz, portanto, podendo ser empregado para as bandas A e B de comunicações móveis celulares.

A expressão para a atenuação neste modelo é dada como

$$L(\text{dB}) = 139,1 - 20\log h_T(\text{m}) + 20 \log d(\text{km}) \quad (3.12)$$

onde $h_R \cong 1,5 \text{ m}$; $d \leq 60 \text{ Km}$; e, $40 < f < 900 \text{ MHz}$.

3.6 – O Modelo de Blonquist-Ladell

O modelo de Bloquist-Ladell [19], utiliza a perda do espaço livre adicionado à raiz quadrada da soma do quadrado dos valores das perdas provocadas pela presença da terra plana e pelo “gume de faca” (se houver). Deve-se observar que sem estes dois últimos termos, o modelo se comporta como uma propagação em visada direta, onde somente o espaço livre interferirá na perda de propagação (L_b).

A expressão para a perda no espaço livre, $L(dB)$, é dada como

$$L(dB) = L_b + \sqrt{L_p^2 + L_k^2} \quad (3.13)$$

onde $5 \leq d \leq 22$ Km; $30 < f < 900$ MHz; L_p representa as perdas devido a terra-plana e L_k representa as perdas devido ao “gume de faca”.

3.7 – O Modelo Cost 231-Hata

Como mencionado anteriormente, o modelo de Okumura-Hata foi obtido como consequência de medições nas faixas de UHF até 2 GHz. Nas faixas superiores de frequência, verificou-se que o modelo não apresentava a precisão requerida. Para tanto, as equações de Hata foram reescritas e adaptadas empiricamente para as faixas mais altas de frequência, onde se situam as bandas C, D e E de comunicações móveis celulares. Tal trabalho foi realizado por pesquisadores europeus que desenvolveram um modelo denominado de COST-231 [36].

As expressões do modelo COST-231 são:

- a) Para áreas urbanas:

$$L \text{ (dB)} = 46,3 + 33,9 \log(f) - 13,82 \log(h_T) - a(h_R) + (44,9 - 6,55 \log h_T) \log(d) + C_M \quad (3.14)$$

sendo f a frequência dada em MHz (1500 – 2000 MHz); h_T a altura da antena na ERB (30m - 200m); h_R a altura da EM (1m – 10m) e d a distância entre a ERB e a UM (1 Km – 20 Km).

a₁) Para cidades pequenas e médias:

$$a(h_R) = [1,1 \log(f) - 0,7] h_R - [1,56 \log(f) - 0,8] \text{ dB} \quad (3.15)$$

a₂) Para cidades grandes:

$$a(h_R) = 8,29(\log 1,54 h_R)^2 - 1,1 \text{ dB; para } f \leq 300 \text{ MHz} \quad (3.16)$$

ou

$$a(h_R) = 3,2(\log 11,75 h_R)^2 - 4,97 \text{ dB; para } f \geq 300 \text{ MHz} \quad (3.17)$$

com $C_M = 3 \text{ dB}$, para áreas urbanas densas, e, $C_M = 0 \text{ dB}$ para outros casos.

3.8 – O Modelo Cost-231 – Walfish-Ikegami

Em um modelo semi-empírico [36], para casos com e sem visibilidade, as expressões para a atenuação são as seguintes:

a) Modelo com Visibilidade: (LOS = line-of-sight)

$$L_b(\text{dB}) = 42,6 + 20 \log(f) + 26 \log(d) \quad (3.18)$$

onde $d \geq 20 \text{ m}$, f a frequência dada em MHz e, d a distância em Km.

Esta perda para ruas sem obstáculos foi tomada como referência nas medições efetuadas em Estocolmo-Suécia.

b) Modelo sem Visibilidade (NLOS ou non-line-of-sight)

Neste modelo são considerados os seguintes parâmetros: (Ver Figuras 3.2 e 3.3)

- Altura do edifício: h_{Roof}
- Largura da rua: w
- Separação entre os edifícios: b
- Orientação da rua com relação à direção da emissão: φ

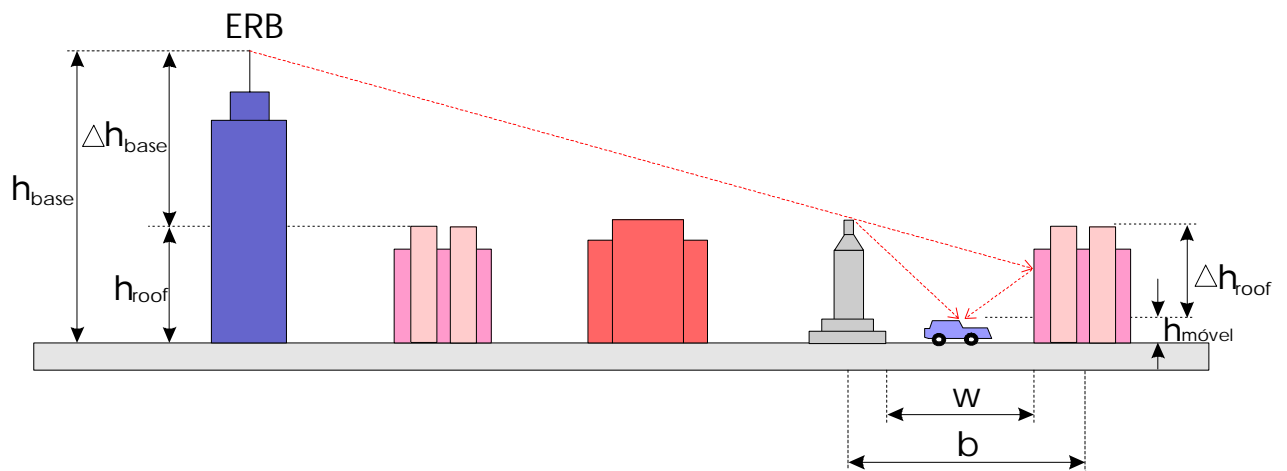


Figura 3.2 – Cenário para o modelo Cost 231 – Walfish-Ikegami.

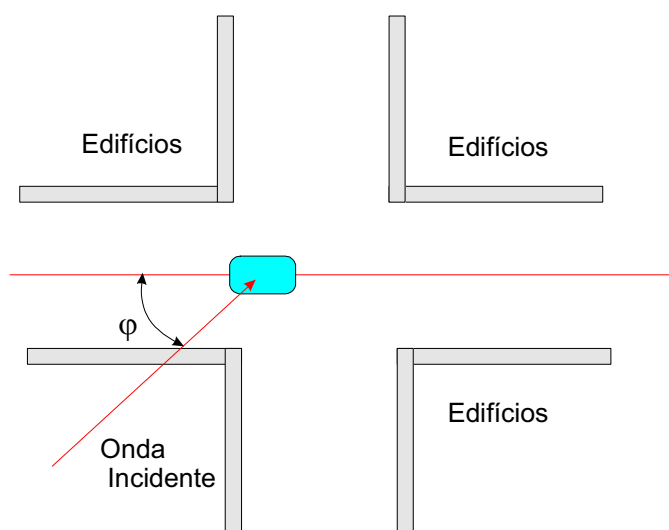


Figura 3.3 – Orientação da rua com relação ao móvel (Cost 231 – Walfish-Ikegami).

Neste caso a perda é calculada através de:

$$L_b = L_0 + L_{rts} + L_{msd} \quad \text{para } L_{rts} + L_{msd} > 0 \quad (3.19)$$

$$L_b = L_0 \quad \text{para } L_{rts} + L_{msd} \leq 0 \quad (3.20)$$

sendo L_{rst} a perda devido a difração e espalhamento, em dB; L_{msd} as perdas devido a múltiplas difrações, em dB.

As expressões para L_0 (dB) e L_{rst} são dadas, respectivamente, por

$$L_0(\text{dB}) = 32,4 + 20 \log(d/\text{Km}) + 20 \log(f/\text{MHz}) \quad (3.21)$$

$$L_{rst} = -16,9 - 10 \log(w) + 10 \log(f) + 20 \log(h_{\text{Móvel}}) + L_{\text{ORI}} \quad (3.22)$$

onde w é a distância em metros (Figura 3.2); $h_{\text{Móvel}}$ é a altura da antena móvel em metros, e, f a frequência em MHz. O parâmetro L_{ORI} assume as seguintes formas:

$$L_{\text{ORI}} = -10 + 0,354\varphi, \quad \text{para } 0^\circ \leq \varphi < 35^\circ \quad (3.23)$$

$$L_{\text{ORI}} = 2,5 + 0,075(\varphi - 35) \quad \text{para } 35^\circ \leq \varphi < 55^\circ \quad (3.24)$$

$$L_{\text{ORI}} = 4,0 - 0,114(\varphi - 55) \quad \text{para } 55^\circ \leq \varphi < 90^\circ \quad (3.25)$$

onde φ é dado em graus, e

$$\Delta h_{\text{Móvel}} = h_{\text{Roof}} - h_{\text{Móvel}} \quad (3.26)$$

$$\Delta h_{\text{Base}} = h_{\text{Base}} - h_{\text{Roof}} \quad (3.27)$$

$$L_{msd} = L_{bsh} + k_a + k_d \log(d) + k_f \log(f) - 9 \log(b) \quad (3.28)$$

sendo a distância d em Km; a frequência f em MHz e, o parâmetro b em metros,

O cálculo da perda é realizado através de:

$$L_{bsh} = -18 \log (1+\Delta h_{Base}) \text{ para } h_{base} > h_{Roof} \text{ e } \Delta h_{Base} \quad (3.29)$$

ou

$$L_{bsh} = 0, \text{ para } h_{base} \leq h_{Roof} \text{ e } \Delta h_{Base} \quad (3.30)$$

sendo

$$k_a = 54, \text{ para } h_{base} > h_{Roof} \quad (3.31)$$

$$k_a = 54 - 0,8\Delta h_{Base} \text{ para } d \geq 5 \text{ Km e } h_{base} \leq h_{Roof} \text{ e } \Delta h_{Base} \quad (3.32)$$

$$k_a = 54 - 0,8\Delta h_{Base} \cdot \frac{d}{0,5}, \text{ } d < 5 \text{ Km e } h_{base} \leq h_{Roof} \quad (3.33)$$

com Δh_{Base} em metros e d em Km.

$$k_d = 18, \text{ para } h_{base} > h_{Roof} \quad (3.34)$$

$$k_d = 18 - 15 \frac{\Delta h_{base}}{h_{roof}}, \text{ para } h_{base} \leq h_{Roof} \quad (3.35)$$

$$k_f = -4 + 0,7 \left(\frac{f}{925} - 1 \right) \quad (3.36)$$

sendo f em MHz, sendo válido para cidades médias e subúrbios; e, finalmente

$$k_f = -4 + 1,5 \left(\frac{f}{925} - 1 \right) \quad (3.37)$$

para centros metropolitanos.

3.9 – O Modelo dos Trajetos Aleatórios em Propagação

O foco do modelo dos trajetos aleatórios [5] parte do princípio da existência de um espaço livre a ser preenchido por uma distribuição aleatória de objetos que espalham. O sinal total recebido será o resultado da superposição dos raios que

chegam ao ponto de recepção. Dois fatores são relevantes na análise: a absorção e o caos do meio ambiente.

Mostra-se neste modelo que a potência recebida é proporcional ao inverso do quadrado da distância e ainda inversamente proporcional a uma exponencial da mesma [32]. Funciona como se um fóton desgovernado se deslocasse no espaço livre aleatoriamente. Na origem deste ambiente desordenado considera-se a existência de uma fonte isotrópica. O sinal recebido destas inúmeras posições e de inúmeros fótons flutuará fortemente, devido ao sinal aleatório, a espalhamentos e a outras fontes. Para o sinal recebido, calcula-se uma média em intervalos de tempo pré-estabelecidos. A onda radiante será considerada com sendo um feixe de fótons que se propaga no ambiente. O sinal que alcança o receptor será o somatório de todos os feixes aleatórios. Neste modelo cada fóton radiante chega à recepção produzindo um acréscimo na potência ou colide num obstáculo qualquer. O fóton pode ou não ser absorvido pelo obstáculo ou ser dispersado aleatoriamente. Neste processo, os fótons se deslocam em uma linha reta mutante, sendo γ a probabilidade de ser um fóton absorvido pelo obstáculo, e, $(1-\gamma)$ a probabilidade dele se espalhar aleatoriamente em outras direções.

Seja $Q(r)$ a função densidade de probabilidade (fdp) de choque do fóton com um obstáculo a uma distancia r (primeiro passo dos trajetos aleatórios). A função densidade de probabilidade, $G(r)$, da absorção do fóton a uma distancia r é obtida resolvendo-se a equação seguinte:

$$G(r) = (\gamma) Q(r) + (1-\gamma) Q * G(r) \quad (3.38)$$

onde o símbolo asterisco, *, representa a operação convolução.

Na tabela 3.1 mostra-se a predição do modelo em função dos parâmetros γ e η . Fazendo a distancia r convergir para uma esfera elementar de raio Δr e $\Delta r \rightarrow 0$, tem-se que a densidade de potência será dada por:

$$P(r) = \frac{G(r)}{\gamma\eta} \quad (3.39)$$

Tabela 3.1 – Predições do modelo de predição de propagação por trajetos aleatórios em função de γ e η .

Parâmetros	Obstáculos	Densidade de Potência Total, 2-D	Densidade de Potência Total, 3-D
Quando $\gamma \rightarrow 1$	Mais absorvedores de RF	$e^{-\eta r} / (2 \pi r)$	$e^{-\eta r} / (4 \pi r^2)$
Quando $\gamma \rightarrow 0$	Mais espalhadores de RF	∞	$\approx 1/r$
Quando $\eta \rightarrow 0$	Sem obstáculos	$1/(2 \pi r)$	$1/(4 \pi r^2)$
		Densidade de Potência radiada, 2-D	Densidade de Potência radiada, 3-D
Quando $\gamma \rightarrow 1$	Mais absorvedores de RF	$e^{-\eta r} / (2 \pi r)$	$e^{-\eta r} / (4 \pi r^2)$
Quando $\gamma \rightarrow 0$	Mais espalhadores de RF	$1/(2 \pi r)$	$1/(4 \pi r^2)$
Quando $\eta \rightarrow 0$	Sem obstáculos	$1/(2 \pi r)$	$1/(4 \pi r^2)$

Quando $\eta \rightarrow 0$ e $\gamma \rightarrow 1$, os fótons são completamente absorvidos pelos obstáculos.

A potência pode ser calculada por:

$$P(r) = \frac{C}{r^2} f(\eta r, \gamma) \quad (3.40)$$

ou

$$P(r) = B \frac{e^{-br}}{r^2} \quad (3.41)$$

onde $P(r)$ é a potência a uma distância r ; e, B e b são constantes a serem calculadas para uma determinada região. $P(r)$ é dado em W/m na situação 2D e em W/m² na situação 3D.

Empregando este modelo de predição de propagação para o cenário da região urbana de Natal, encontrou-se para as constantes b e B , os seguintes valores: $b = 0,00025$ e $B = 0,0296$ para a situação Geral Natal; $b = 0,00024$ e $B = 0,0290$ para a situação Sul Natal; $b = 0,00025$ e $B = 0,0291$ para a situação Norte Natal; $b = 0,00020$ e $B = 0,0288$ para a situação Oeste Natal.

Baseado neste modelo dos trajetos aleatórios [5], pode-se desenvolver um modelo para a predição de perda de propagação, baseado em dados coletados através de campanhas de medições. As medições foram realizadas em círculos (com raios variáveis) ao redor de um ponto de transmissão. Em caso de impossibilidade de fazer movimentos circulares, estes foram lineares mantendo-se, entretanto, a circularidade após a coleta, com raios constantes. Embora este modelo considere apenas a quantidade de obstáculos e a característica de absorção destes obstáculos no ambiente estudado, em especial para micro-célula, ele tem demonstrado um bom desempenho se comparado com outros métodos apresentados.

3.10 – Modelo Estatístico de Predição para Ambientes Urbanos

O modelo estatístico de predição de perda de propagação proposto é empírico, e basicamente consiste em se acrescentar estatísticas de 2ª. ordem obtidas das funções densidades de probabilidade, para a potência recebida e a altimetria medidas, à equação do modelo de perdas lineares.

A expressão para a predição da perda de propagação, baseado no modelo proposto, é dada como

$$L(\text{dB}) = A + 10 \log \left(\frac{r}{r_0} \right)^\gamma - X_\sigma \quad (3.42)$$

onde $L(\text{dB})$ é a perda de propagação; r é a distância considerada em Km; r_0 é a distância de referência, neste caso igual a 0,001 Km; $A = 32,44 + 20 \log (f) + 20 \log (r_0)$, com $f = 931,0125$ MHz e $r_0 = 0,001$ Km; $A = 31,82$ dB; γ é o expoente de perda de propagação característica do meio (Geral Natal, $\gamma = 3,84$); e, X_σ é a variável aleatória com distribuição lognormal (em dB) conjunta e independente associada ao relevo e a potência recebida.

Seja considerar a situação Geral Natal, ou seja, levando-se em conta todas as medições e características do relevo de Natal. Através dos conjuntos de valores medidos em campo (relevo e potência - ver capítulos 4, 5 e 6), pode-se desenvolver as suas funções densidades probabilidades (fdp); a fdp está relacionada com o

desvio padrão (σ) e foi obtida numericamente através do emprego dos softwares STATGRAPHICS®, MATLAB® ou MAPLE®.

Na Figura 3.4, está ilustrado um histograma da curva de probabilidade (0% a 100%) em função da potência recebida (dBmW) na unidade móvel, a uma certa distância e altitude da ERB. Na curva considerada, verifica-se que para potências em torno de -80 dBmW, ocorre a probabilidade máxima próximo de 24%. Observa-se que a curva de probabilidade é descrita, aproximadamente, pelos pontos médios dos valores amostrais do histograma.

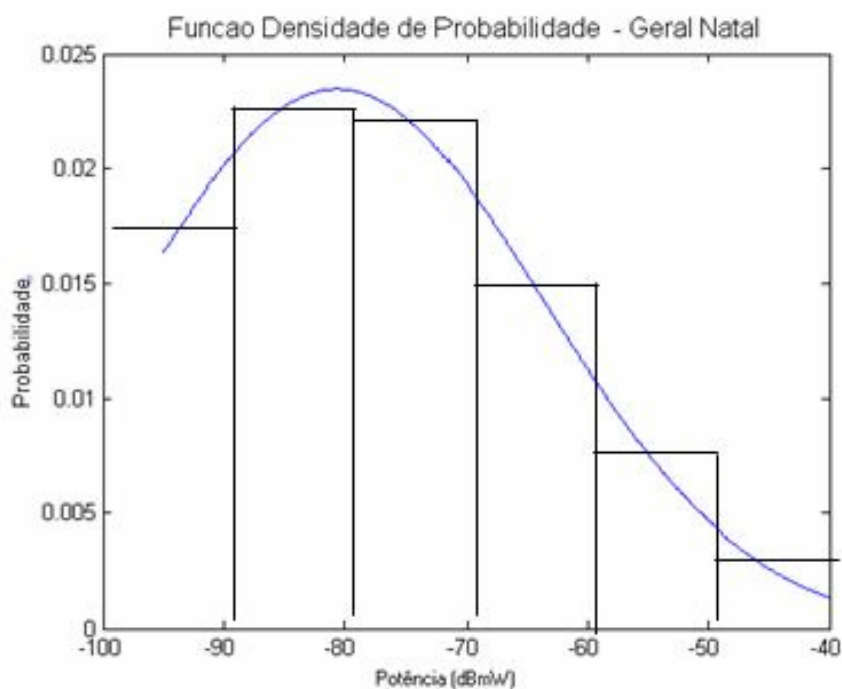


Figura 3.4 – Histograma e curva da fdp da potência recebida.

Na Figura 3.5 está ilustrada o histograma, a fdp e sua curva de ajuste para a potência recebida no caso de Geral Natal. Observa-se que para este caso, há uma superposição da fdp e sua respectiva curva de ajuste, que é aproximada por um polinômio do 5º. grau. Na Tabela 3.2 tem-se os valores tabelas referentes a Figura 3.5

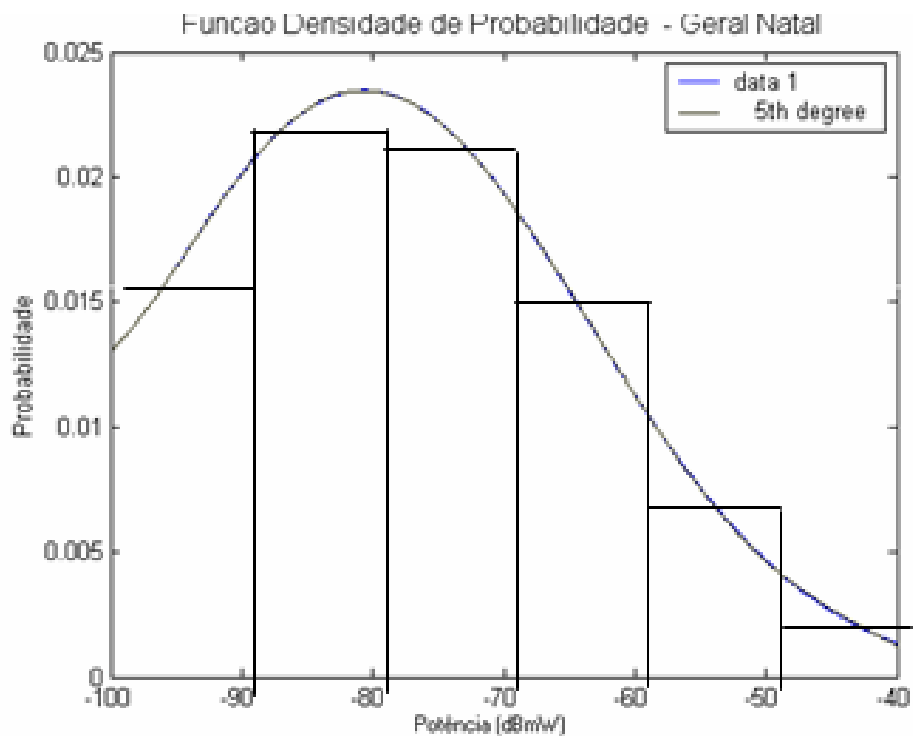


Figura 3.5 – Histograma, curva da fdp e curva de ajuste (polinômio de 5ª. ordem).

Tabela 3.2 – Valores assintóticos e estatísticos da curva da Figura 3.5.

	X
Valor Mínimo	-100
Valor Máximo	-40
Valor Médio	-67,5
Mediana	-67,5
Desvio Padrão	15,92
Faixa	55

A curva pode ser modelada através de um polinômio do 5º. grau, expressa como

$$Y = -4,3952 \times 10^{(-10)}x^5 - 1,4616 \times 10^{(-7)}x^4 - 1,8435 \times 10^{(-5)}x^3 - 0,0011023x^2 - 0,031791x - 0,3545 \quad (3.43)$$

Entretanto, (3.43) pode ser expressa como

$$P_r(r) = \frac{|r|}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.44)$$

sendo o valor do desvio padrão $\sigma = 15,92$.

A fdp em (3.44), também pode ser expressa em termos de um parâmetro **K**, usualmente definido como *fator da fdp* e dada como

$$K = \frac{FATOR_CONSTANTE_DA_POTENCIA}{FATOR_ALEATÓRIO_DA_POTENCIA} = \frac{r^2/2}{\sigma^2} = \frac{r^2}{2\sigma^2} \quad (3.45)$$

Portanto, a fdp na Equação (3.44) expressa a potência total em um ponto, a partir da potência direta (potencia constante = $r^2/2$), acrescida de uma potencia aleatória (σ^2) que é característica do ambiente Rayleigh, com distribuição normal. O fator **K** é a relação entre as duas potências consideradas.

Analisando-se a Equação (3.42), observa-se que tem-se uma contribuição da perda no espaço livre no primeiro termo, um termo que depende do meio de propagação (γ), podendo nele estar incluso valor estocástico e o terceiro termo (ajuste) onde se consolida o modelo, na qual está incluída a aleatoriedade do sinal.

A potência recebida a uma distancia “r”, em unidades logarítmicas, é dada como

$$Pr [(dBm)] = Pt [dBm] - L(dB) \quad (3.46)$$

$$Pr[(dBm)] = Pt[dBm] - A - 10 \log\left(\frac{r}{r_0}\right)^\gamma + X_\sigma \quad (3.47)$$

onde $Pr(dBm)$ é a potência recebida e $Pt(dBm)$ é a potência transmitida.

A Figura 3.6 ilustra o histograma e a curva da fdp para as altitudes do relevo da área urbana da cidade Natal (Grande Natal). Observa-se novamente que a curva fdp passa, aproximadamente, pelos pontos médios dos valores amostrais do histograma.

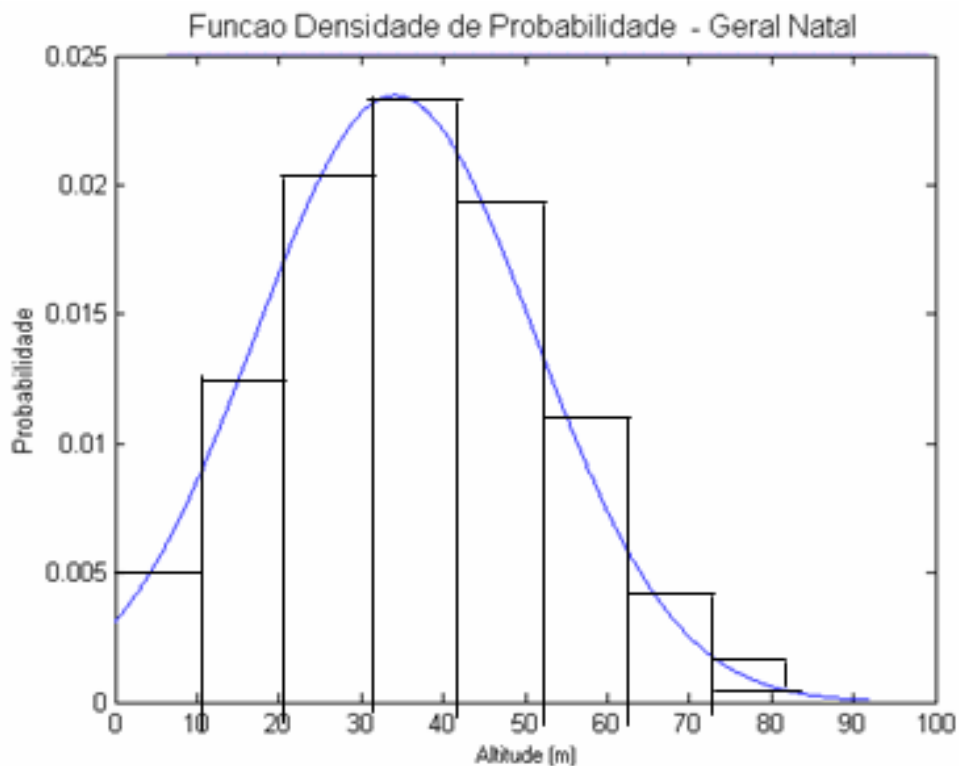


Figura 3.6 – Histograma e curva da fdp das variações das altitudes.

Na Figura 3.7 tem-se ilustradas as curvas da função densidade de probabilidade (fdp) e sua respectiva curva de ajuste para a altitude da área urbana da cidade de Natal. Observa-se que a curva fdp e a curva de ajuste são praticamente coincidentes e que as curvas passam aproximadamente pelos pontos médios dos valores amostrais do histograma. Na Tabela 3.3, estão expressos os valores assintóticos e estatísticos para a Figura 3.7.

A equação da curva ajustada na Figura 3.7 é dada por

$$Y = -1,7883 \times 10^{(-10)}x^5 + 4,49316E(-8)x^4 - 3,8157 \times 10^{(-6)}x^3 + 0,00011449x^2 - 0,00047x + 0,004722 \quad (3.48)$$

sendo que y é o valor constante no eixo probabilidade e x o valor no eixo em metros.

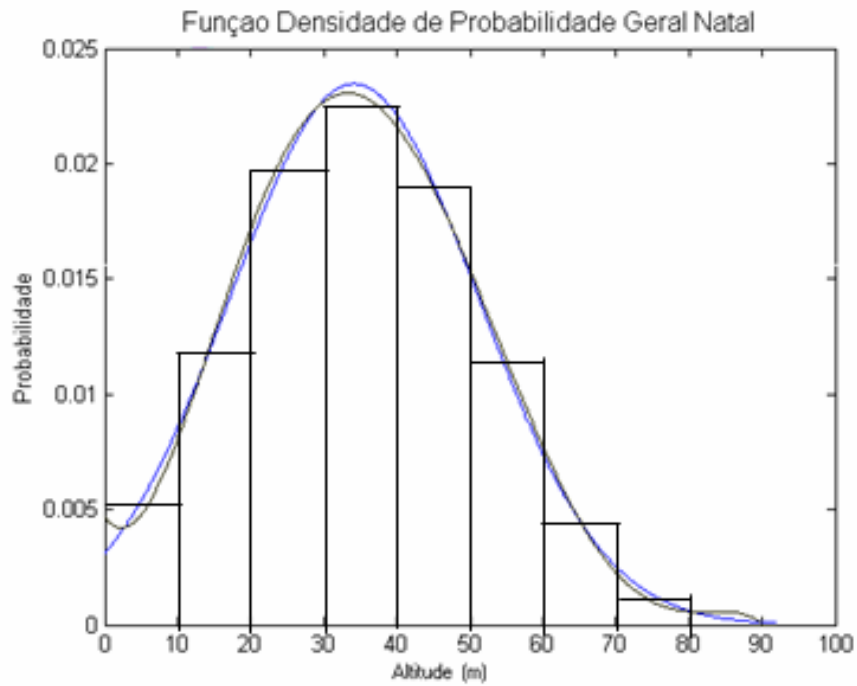


Figura 3.7 – Histograma e curvas da fdp das altitudes e de ajuste (polinômio de 5ª. ordem).

Tabela 3.3 – Valores assintóticos e estatísticos da curva da Figura 3.7.

	X
Valor Mínimo	0
Valor Máximo	92
Valor Médio	46
Mediana	46
Desvio Padrão	26,6
Faixa	92

A equação de ajuste (3.48) também ser expressa através de

$$P_r(r) = \frac{|r|}{\sigma^2} \exp \left(-\frac{r^2}{2\sigma^2} \right) \quad (3.49)$$

sendo o desvio padrão, $\sigma = 26,6$.

A variável aleatória, X_σ , em (3.42) pode ser expressa como

$$X_\sigma = \text{função}(X_{\sigma\text{altitudes}}; X_{\sigma\text{potência}}) \quad (3.50)$$

ou

$$X_{\sigma} \text{ (dB)} = \beta \cdot 10 \log (X_{\sigma \text{altitudes}} \cdot X_{\sigma \text{potência}}) = \beta \cdot 10 \log(15,92 \times 26,6) \quad (3.51)$$

onde β é uma constante associada ao fator de ajuste, com valor igual a 2,056.

Como os valores de $X_{\sigma \text{altitudes}}$ e $X_{\sigma \text{potência}}$ são, respectivamente, 15,92 e 26,6, então, teremos que $X_{\sigma} = 54$ dB.

A expressão final para o modelo estatístico desenvolvido pode ser dada como

$$L(\text{dB}) = A + 10 \log \left(\frac{r}{r_0} \right)^{\gamma} - [54 + \Gamma] \quad (3.52)$$

$$L(\text{dB}) = A + 10 \log \left(\frac{r}{r_0} \right)^{\gamma} - [B] \quad (3.52a)$$

sendo Γ uma função aleatória que varia entre $[-1,1]$ e pode ser associada a um ambiente Rayleigh. A é uma constante; r_0 é a distância de referência em Km, sendo usualmente maior do que a região de campo próximo da antena; r é a distância em Km entre a Tx-Rx; γ é o expoente de propagação do meio. Com $B = [54 - \Gamma]$ para Geral Natal; $B = [53,2 - \Gamma]$ para Sul Natal; $B = [55,3 - \Gamma]$ para Oeste Natal; $B = [53 - \Gamma]$ para Norte Natal.

3.11 – Resultados Numéricos

A seguir serão mostradas e analisadas diversas curvas para os diversos modelos de perda de propagação para as regiões norte, sul e leste da cidade de Natal-RN.

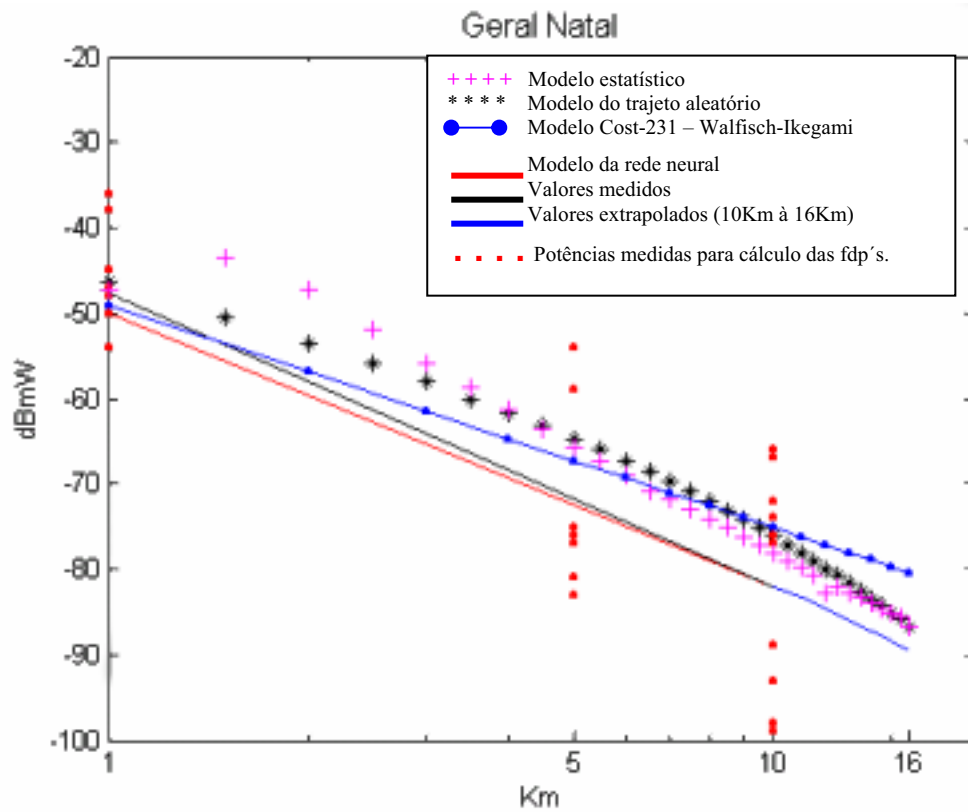


Figura 3.8 – Comparação de modelos de predição empregados.

Tabela 3.4 - Resultados - Geral Natal

Método	Erro Médio Absoluto(dB) (\bar{E})	Desvio Padrão (dB) (σ)	Erro RMS (dB)
RNA (teste)	1,2701	8,3433	8,4394
Trajeto Aleatório	4,2234	11,7211	12,4587
Modelo Desenvolvido neste Trabalho	4,9876	12,3936	13,3595
COST231-Walfish-Ikegami	2,8793	17,0600	17,3012

Observando a Tabela 3.4, constata-se que o modelo da Rede Neural (Ver Capítulo 5) apresentou melhor desempenho, onde o erro médio absoluto é de 1,2701 dB; desvio padrão de 8,3433 dB e o erro RMS de 8,4394 dB. No modelo do trajeto aleatório o erro médio absoluto é de 4,2234 dB; desvio padrão de 11,7211 dB e o erro RMS de 12,4587 dB. No modelo desenvolvido o erro médio absoluto é de 4,9876 dB; desvio padrão de 12,3936 dB e o erro RMS de 13,3595 dB. No modelo COST231-Walfish-Ikegami o erro médio absoluto é de 2,8793 dB; desvio padrão de 17,0600 dB e o erro RMS de 17,3012.

REGIÃO OESTE

De maneira análoga ao caso do gráfico para Geral Natal, aqui também a figura (Figura 3.9) ilustra a função densidade de probabilidade e seu histograma para a região Oeste Natal.

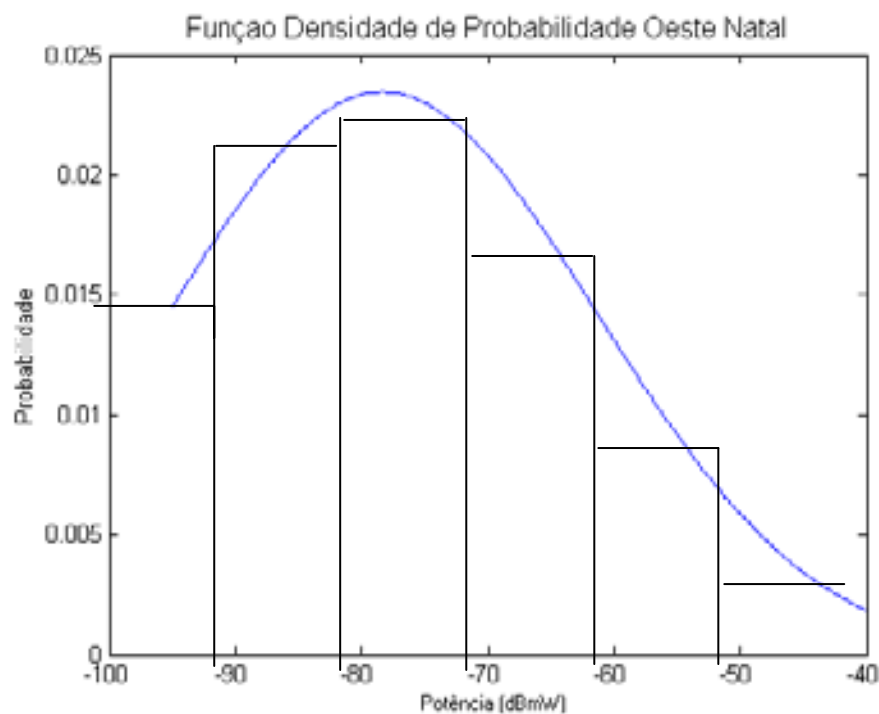


Figura 3.9 – Função densidade de probabilidade da potencia recebida.

Para a Figura 3.10, tem-se também o histograma, a função fdp e a curva de ajuste para a região Oeste Natal. Verifica-se também uma superposição das curvas da fdp e a de ajuste. Na Tabela 3.5, lista-se os valores assintóticos e estatísticos

para as curvas da Figura 3.10. Na Figura 3.11 tem-se a fdp das altitudes e na Figura 3.12 a sua curva ajustada e na Tabela 3.6 os seus valores assintóticos e estatísticos. Na Figura 3.13 tem-se a comparação de modelos de predição para a região Oeste de Natal.

A equação da Curva ajustada é dada por

$$Y = -4,45 \times 10^{(-10)}x^5 - 1,43 \times 10^{(-7)}x^4 - 1,75 \times 10^{(-5)}x^3 - 0,001x^2 - 0,028x - 0,305 \quad (3.53)$$

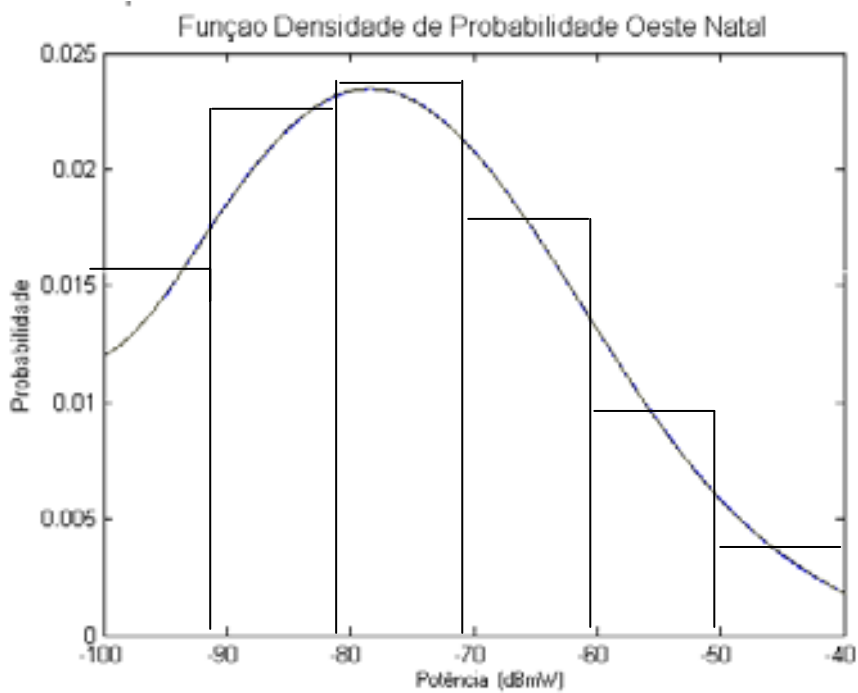


Figura 3.10 – Histograma e curva da fdp e sua curva de ajuste (polinômio do 5º grau) da potência recebida.

Tabela 3.5 – Valores assintóticos e estatísticos da curva de ajuste da fdp da Figura 3.10.

	X
Valor Mínimo	-100
Valor Máximo	-40
Valor Médio	-67,5
Mediana	-67,5
Desvio Padrão	15,92
Faixa	55

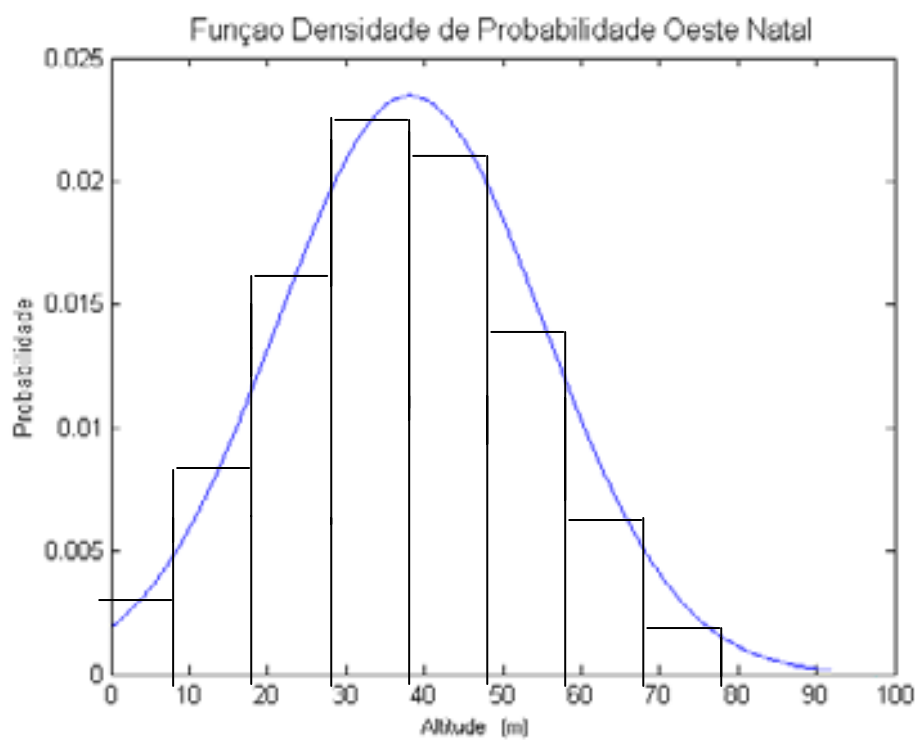


Figura 3.11 – Função densidade de probabilidade das altitudes.

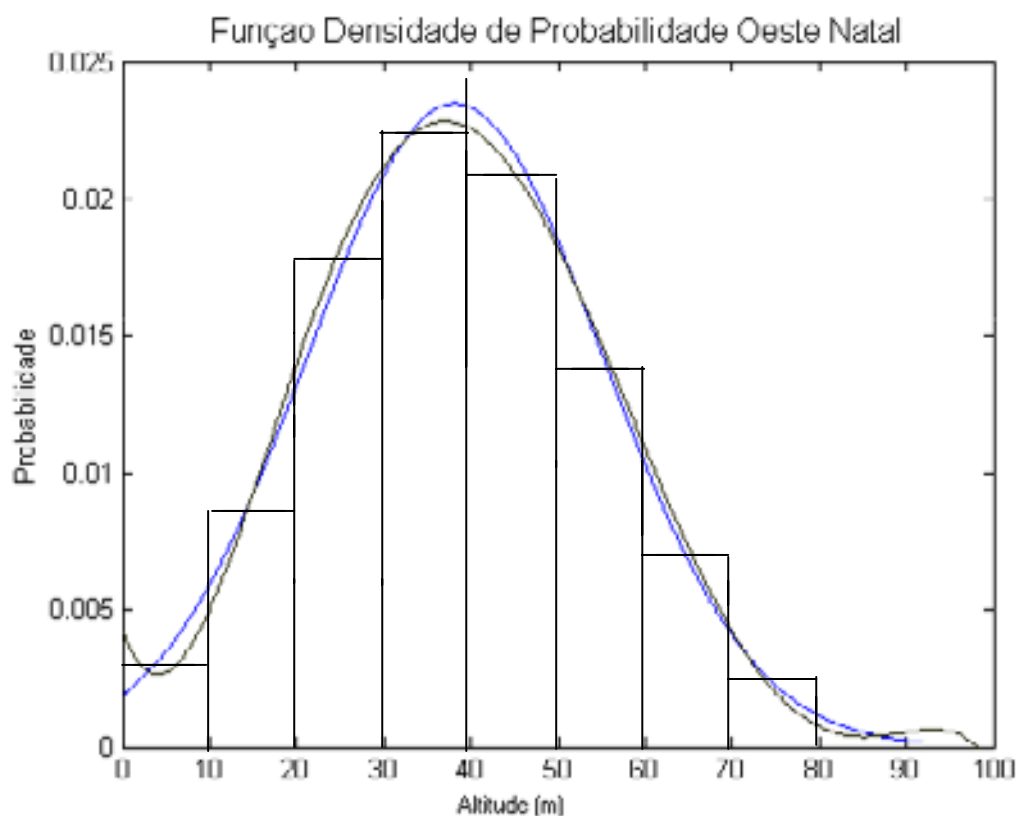


Figura 3.12 - Curva da fdp relativa a altitude e sua curva de ajuste (polinômio do 5º grau).

Tabela 3.6 – Valores assintóticos e estatísticos da curva de ajuste da fdp para a Figura 3.12 e referente à altitude

	X
Valor Mínimo	0
Valor Máximo	92
Valor Médio	46
Mediana	46
Desvio Padrão	26,6
Faixa	92

A equação da Curva ajustada é dada por

$$Y = -1,45 \times 10^{(-10)}x^5 + 3,90 \times 10^{(-8)}x^4 - 3,65 \times 10^{(-6)}x^3 + 0,00012x^2 - 0,0008x + 0,004 \quad (3.54)$$

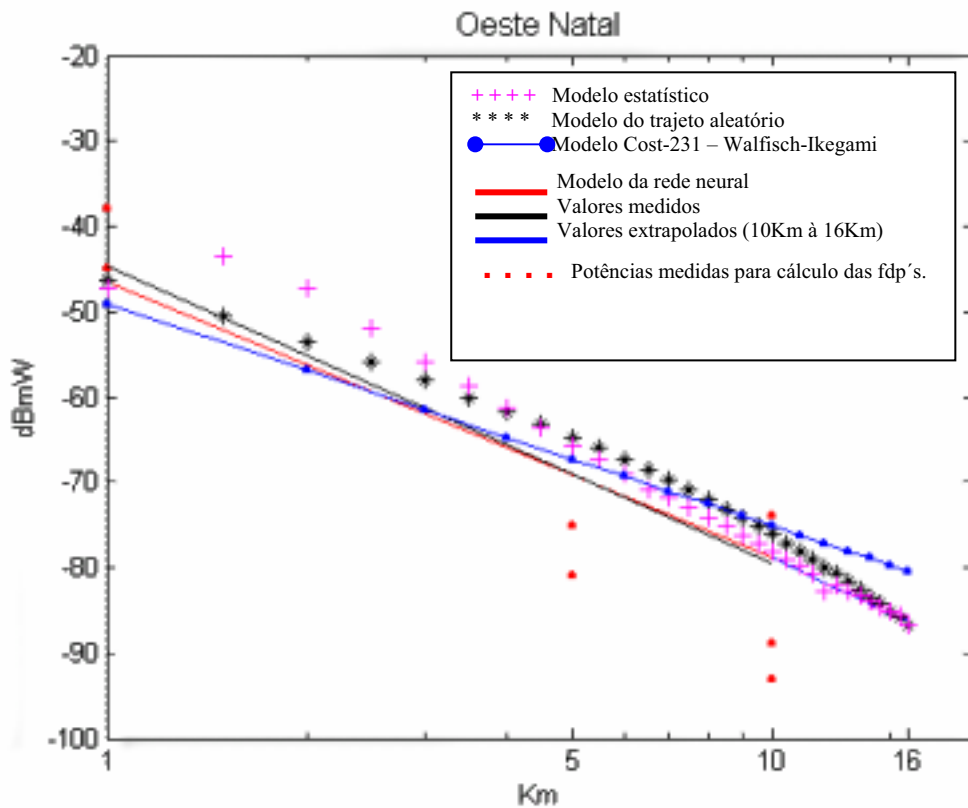


Figura 3.13 – Comparação de modelos de previsão de propagação empregados.

Tabela 3.7 – Resultados - Oeste Natal

Método	Erro Médio Absoluto(dB) (\bar{E})	Desvio Padrão (dB) (σ)	Erro RMS (dB)
RNA (Teste)	0,0909	8,3180	8,3165
Trajeto Aleatório	2,3636	9,4868	9,8710
Modelo Desenvolvido neste Trabalho	2,7272	9,76	10,1353
COST231-Walfish-Ikegami	1,6304	17,0600	17,1377

Observando a Tabela 3.7 constata-se que o modelo da Rede Neural apresentou melhor desempenho, onde o erro médio absoluto é de 0,0909 dB; desvio padrão de 8,3180 dB e o erro RMS de 8,3165 dB. No modelo do trajeto aleatório, o erro médio absoluto é de 2,3636 dB; desvio padrão de 9,4868 dB e o erro RMS de 9,8710 dB. No modelo desenvolvido, o erro médio absoluto é de 2,7272 dB; desvio padrão de 9,76 dB e o erro RMS de 10,1353 dB.

No modelo COST231-Walfish-Ikegami o erro médio absoluto é de 1,6304 dB; desvio padrão de 17,0600 dB e o erro RMS de 17,1377 dB.

REGIÃO SUL

Para a Figura 3.14, tem-se a fdp da potência recebida para a região Sul; na Figura 3.15 tem-se a curva referente a fdp e a curva de ajuste para a região, superpostas; na Tabela 3.8 tem-se os valores assintóticos e estatísticos referentes a Figura 3.15; na Figura 3.16 tem-se a fdp referente a altitude e na Figura 3.17 a superposição da curva da fdp da altitude com a curva de ajuste; na Tabela 3.9 tem-se os valores assintóticos e estatísticos referentes a Figura 3.17; na Figura 3.18 tem-se a comparação de modelos de predição para a região Sul de Natal.

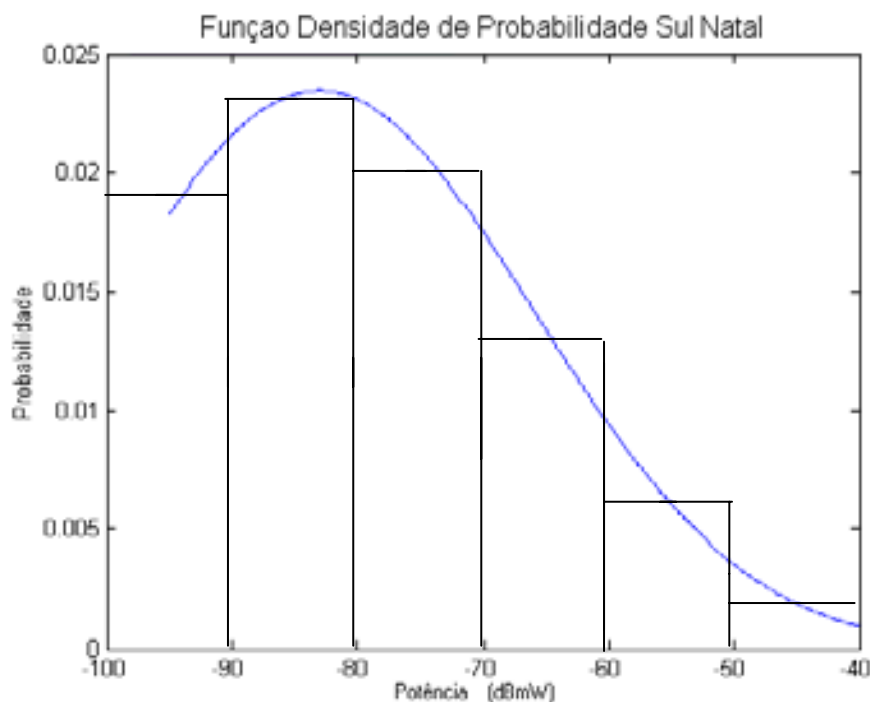


Figura 3.14 – Função densidade de probabilidade da potencia recebida.

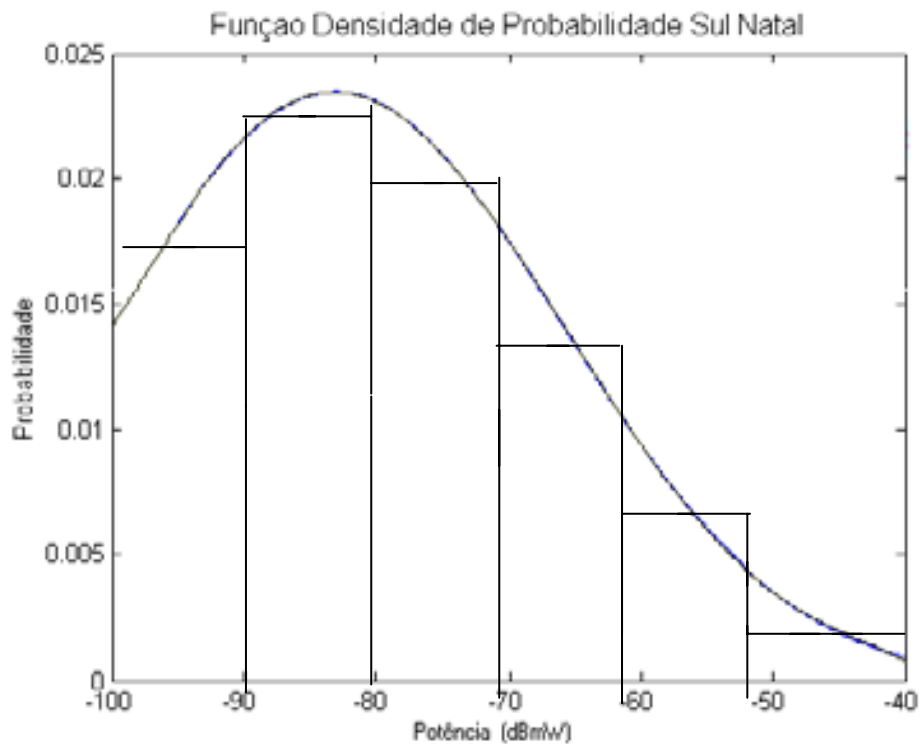


Figura 3.15 - Curvas da FDP e sua curva de ajuste para um polinômio de 5ª. ordem, referentes a potência recebida.

Tabela 3.8 – Valores assintóticos e estatísticos da curva de ajuste para a Figura 3.15.

	X
Valor Mínimo	-100
Valor Máximo	-40
Valor Médio	-67,5
Mediana	-67,5
Desvio Padrão	15,92
Faixa	55

A equação da Curva ajustada é dada por

$$Y = -3,95 \times 10^{(-10)}x^5 - 1,35 \times 10^{(-7)}x^4 - 1,76 \times 10^{(-5)}x^3 - 0,001x^2 - 0,03x - 0,372 \quad (3.55)$$

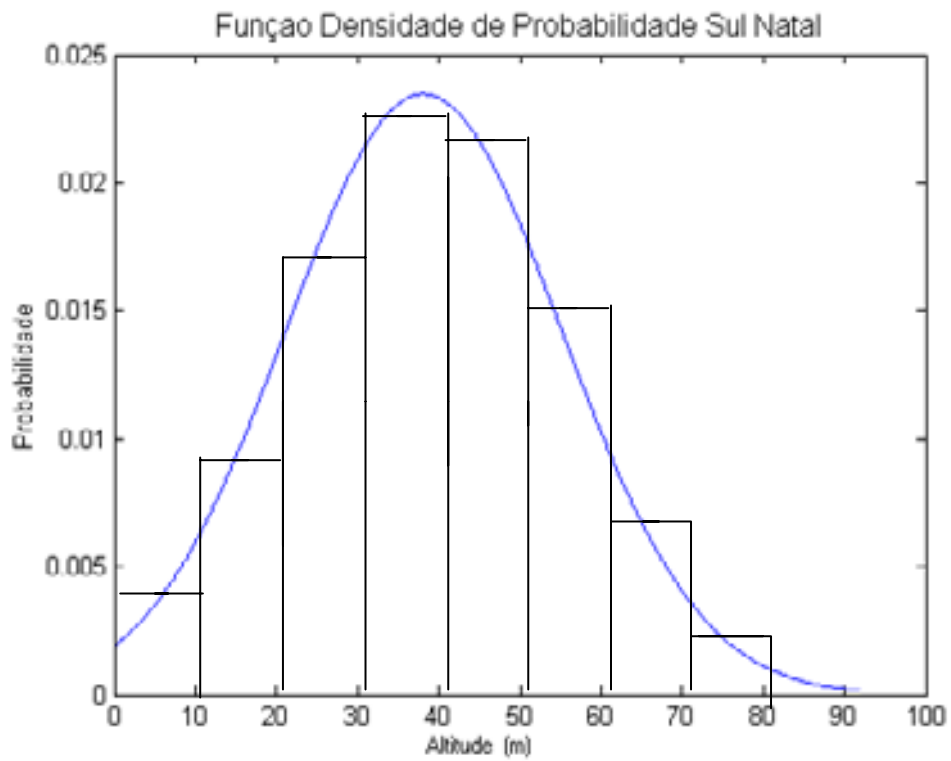


Figura 3.16 – Função densidade de probabilidade referente à altitude.

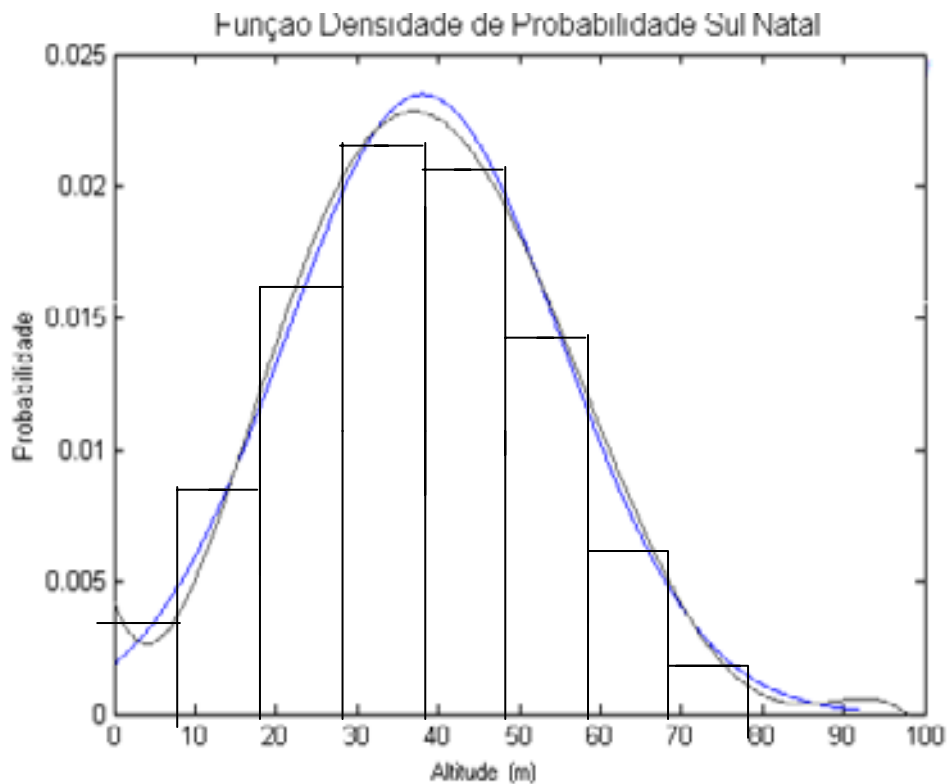


Figura 3.17 - Curvas da fdp e sua curva de ajuste para um polinômio de 5ª. ordem, referentes a altitude.

Tabela 3.9 – Valores assintóticos e estatísticos da curva de ajuste para a da Figura 3.17.

	X
Valor Mínimo	0
Valor Máximo	92
Valor Médio	46
Mediana	46
Desvio Padrão	26,6
Faixa	92

A equação da curva ajustada é dada por

$$Y = -1,43 \times 10^{(-10)}x^5 + 3,92 \times 10^{(-8)}x^4 - 3,66 \times 10^{(-6)}x^3 + 0,00012x^2 - 0,0008x + 0,004 \quad (3.56)$$

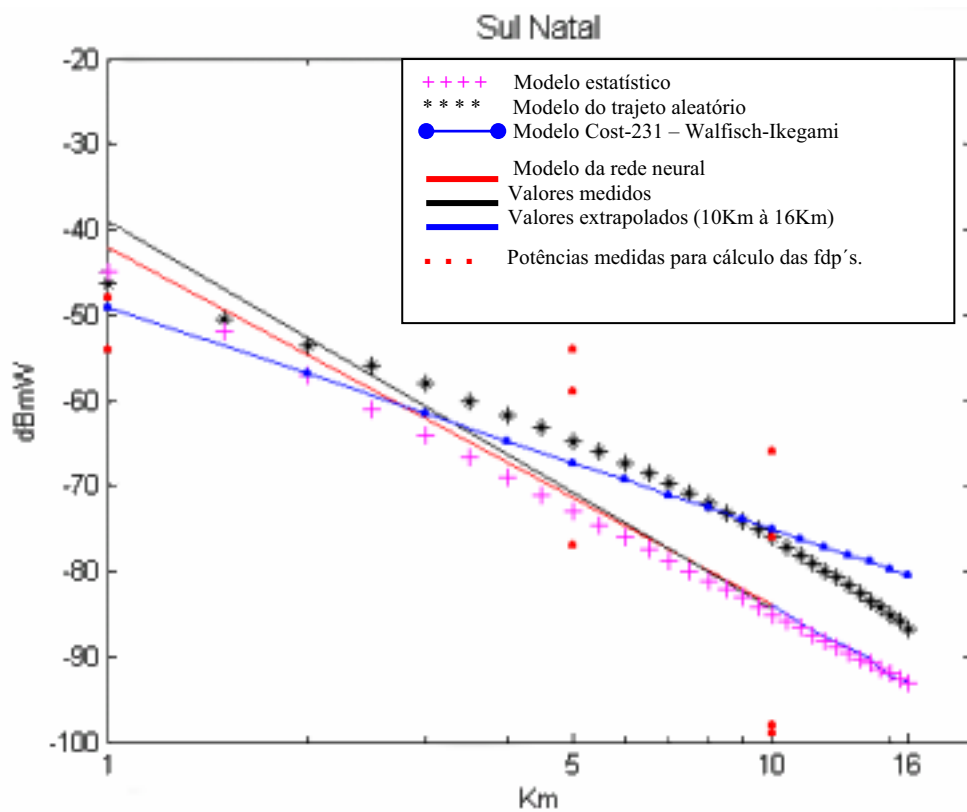


Figura 3.18 – Comparação de desempenho de modelos de predição usados.

Tabela 3.10 - Resultados - Sul Natal

Método	Erro Médio Absoluto(dB) (\bar{E})	Desvio Padrão (dB) (σ)	Erro RMS (dB)
RNA (teste)	1,2701	8,3433	8,4394
Trajeto Aleatório	4,2234	11,7211	12,4587
Modelo Desenvolvido Neste Trabalho	4,9876	12,3936	13,3595
COST231-Walfish-Ikegami	7,0888	17,0600	18,4742

Analisando a Tabela 3.10, observamos que o modelo da rede neural apresentou melhor desempenho, onde o erro médio absoluto é de 1,2701 dB; desvio padrão de 8,3433 dB e o erro RMS de 8,4394 dB. No modelo do trajeto aleatório o erro médio absoluto é de 4,2234 dB; desvio padrão de 11,7211 dB e o erro RMS de 12,4587 dB. No modelo desenvolvido o erro médio absoluto é de 4,9876 dB; desvio padrão de 12,3936 dB e o erro RMS de 13,3595 dB. No modelo COST231-Walfish-Ikegami o erro médio absoluto é de 7,0888 dB; desvio padrão de 17,0600 dB e o erro RMS de 18,4742 dB.

REGIÃO NORTE

Para a Figura 3.19, tem-se a fdp da potência recebida para a região Norte; na Figura 3.20 tem-se a curva referente a fdp e a curva de ajuste para a região, superpostas; na Tabela 3.11 tem-se os valores assintóticos e estatísticos referentes a Figura 3.20; na Figura 3.16 tem-se a fdp referente a altitude e na Figura 3.17 a superposição da curva da fdp da altitude com a curva de ajuste; na Tabela 3.12 tem-se os valores assintóticos e estatísticos referentes a Figura 3.17; na Figura 3.18 tem-se a comparação de modelos de predição para a região Norte de Natal.

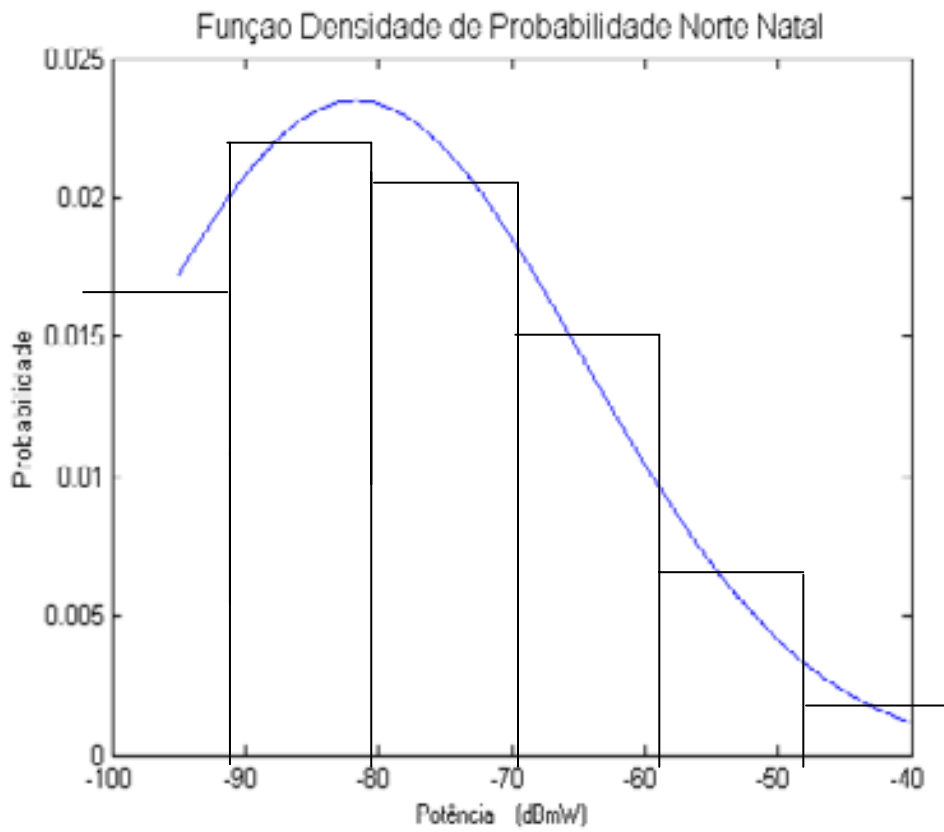


Figura 3.19 – Função densidade de probabilidade da potencia recebida.

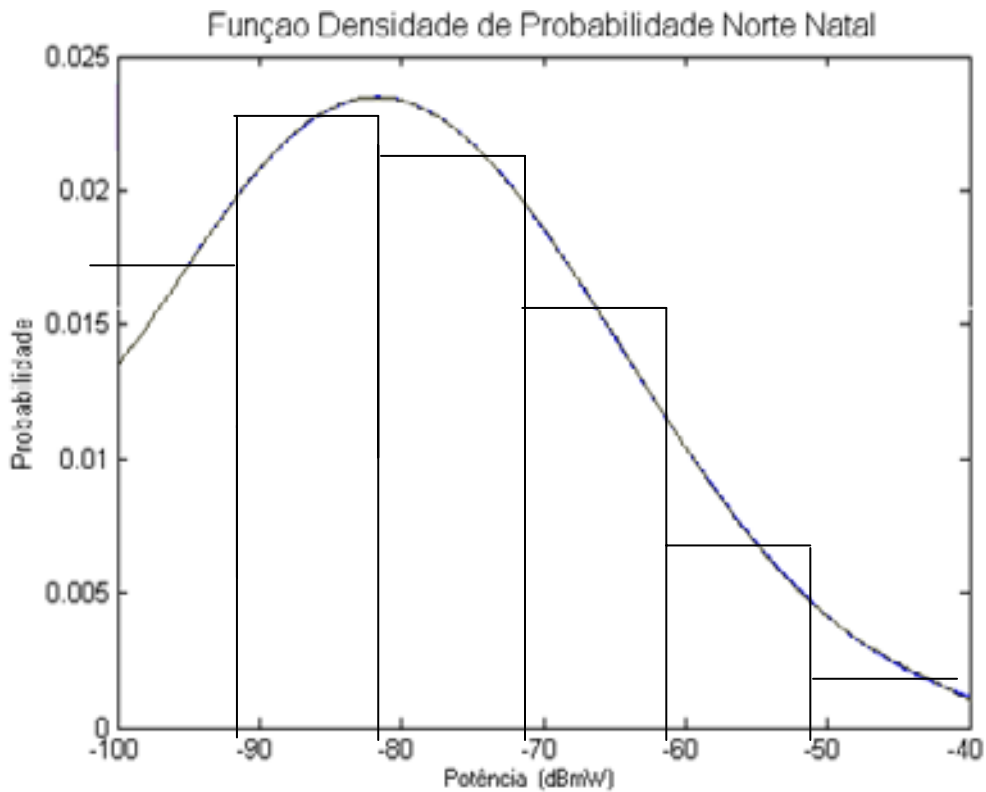


Figura 3.20 - Curvas da fdp e sua curva de ajuste para um polinômio de 5ª. ordem referentes à potência.

Tabela 3.11 – Valores assintóticos e estatísticos da curva de ajuste da fdp para a Figura 3.20.

	X
Valor Mínimo	-100
Valor Máximo	-40
Valor Médio	-67,5
Mediana	-67,5
Desvio Padrão	15,92
Faixa	55

A equação da Curva ajustada é dada por

$$Y = -1,47 \times 10^{-10}x^5 + 3,20 \times 10^{-8}x^4 - 2,15E \times 10^{-6}x^3 - 3,20 \times 10^{-5}x^2 - 0,0007x - 0,0065 \quad (3.57)$$

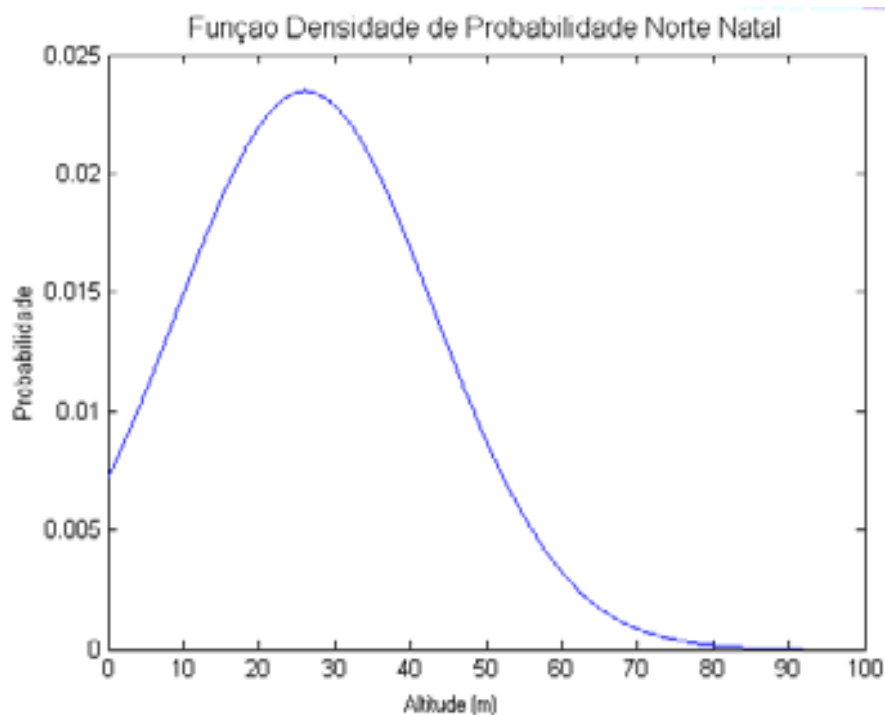


Figura 3.21 – Função densidade de probabilidade das altitudes.

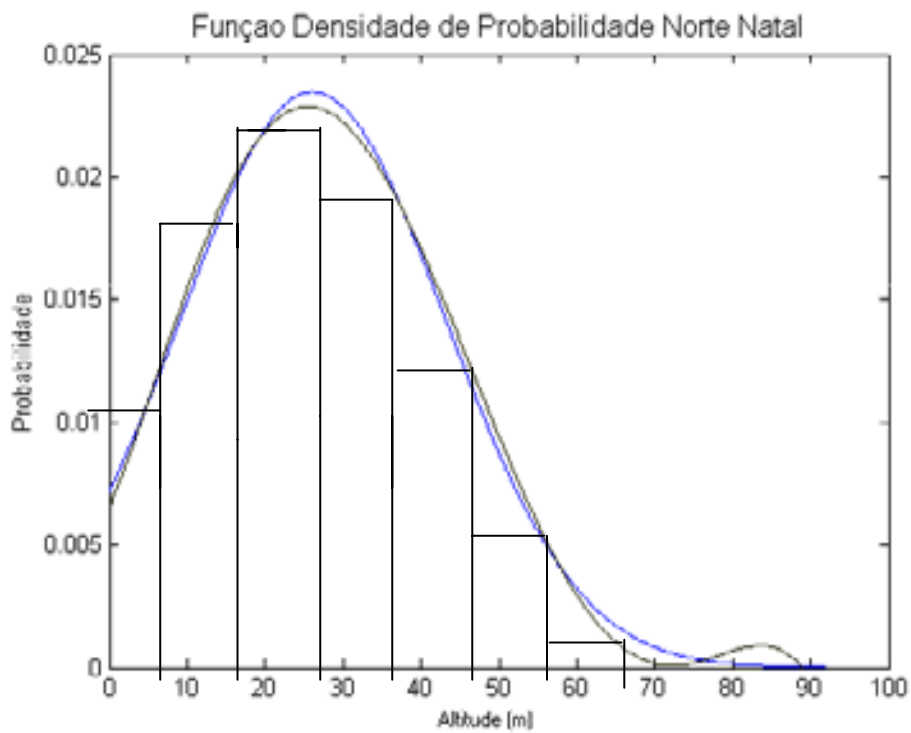


Figura 3.22 - Curvas da fdp e sua curva de ajuste para um polinômio de 5ª. ordem referentes à altitude.

Tabela 3.12 - Valores da curva de ajuste da fdp para a Figura 3.22.

	X
Valor Mínimo	0
Valor Máximo	92
Valor Médio	46
Mediana	46
Desvio Padrão	26,6
Faixa	92

A Curva ajustada é dada por

$$Y = -1,43E (-10)x^5 + 3,92E (-8)x^4 - 3,66E (-6)x^3 + 0,00012x^2 - 0,0008x + 0,004 \quad (3.58)$$

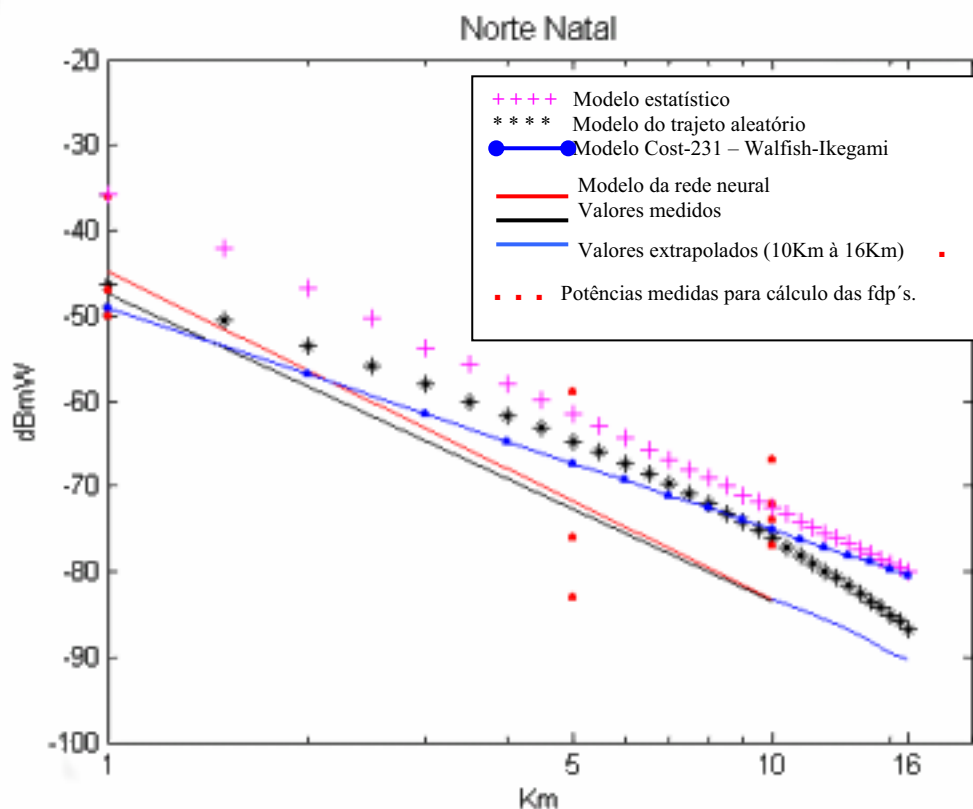


Figura 3.23 – Comparação de modelos de propagação empregados.

Tabela 3.13 - Resultados - Norte Natal

Método	Erro Médio Absoluto(dB) (\bar{E})	Desvio Padrão (dB) (σ)	Erro RMS (dB)
RNA (teste)	0,7272	6,3316	6,3732
Trajeto Aleatório	6,4540	9,7501	11,6926
Modelo Desenvolvido Neste Trabalho	11,9091	9,0287	14,9447
COST231-Walfish-Ikegami	5,7054	17,0600	17,9887

Observando-se a Tabela 3.13, tem-se que o modelo da rede neural apresentou melhor desempenho, onde o erro médio absoluto é de 0,7272 dB; desvio padrão de 6,3316 dB e o erro RMS de 6,3732 dB. No modelo do trajeto aleatório o erro médio absoluto é de 6,4540 dB; desvio padrão de 9,7501 dB e o erro RMS de 11,6926 dB. No modelo desenvolvido o erro médio absoluto é de 11,9091 dB; desvio padrão de 9,0287 dB e o erro RMS de 14,9447 dB. No modelo COST231-Walfish-Ikegami o erro médio absoluto é de 5,7054 dB; desvio padrão de 17,0600 dB e o erro RMS de 17,9887 dB.

3.12 – Medidas de campo usadas na perda de propagação em comunicações móveis

Os procedimentos básicos para obtenção de um modelo ponto-a-ponto para comunicações móveis são os seguintes: (1) definição da condição padrão, (2) obtenção de um modelo, ou predição ponto-a-área, e (3) a obtenção de um modelo ponto-a-ponto tendo como base de dados os valores obtidos pela predição ponto-a-área. A grande vantagem de um modelo ponto-a-ponto é a que ele permite usar antenas diretivas, as quais acrescentam vários benefícios ao sistema de comunicação celular, sendo um dos mais importantes a minimização do efeito da propagação por múltiplos percursos.

Nas comunicações móveis o modelo ponto-a-ponto pode ser aplicado desde que a EM num determinado instante esteja em um ponto fixo [1], [4], [16]. Este modelo tem vantagens de considerar as ondulações naturais do terreno e os efeitos das construções civis. Cidades com topografias idênticas têm comportamentos diferentes com relação ao campo eletromagnético recebido em função do seu arranjo urbanístico.

Nas medições foram empregadas os seguintes equipamentos: Um medidor de campo Anritsu - Modelo ML524B (25MHz–1.000MHz) e um Monitor de Serviço de Comunicações IFR - Modelo AM/FM 1200S/A.

Nos procedimentos de medição foram considerados doze pontos para uma distancia de 10 Km; oito pontos para uma distancia de 5 Km e 8 pontos para uma distancia de 1 Km. A potência de transmissão, P_t , é igual a 40 W (16,02 dBW). As coordenadas do ponto de transmissão foram: $05^{\circ}47'16''S$ e $035^{\circ}12'17''W$ (Figura 3.24).

O procedimento de medição aqui desenvolvido nos forneceu os expoentes de perda de propagação para a cidade de Natal-RN. Estas medidas foram segmentadas, também, através das zonas Norte, Sul e Oeste (Figuras 3.25; 3.26; 3.27 e 3.28).



Figura 3.24 - Pontos da medição Geral e a medição por zonas: norte; sul e oeste.

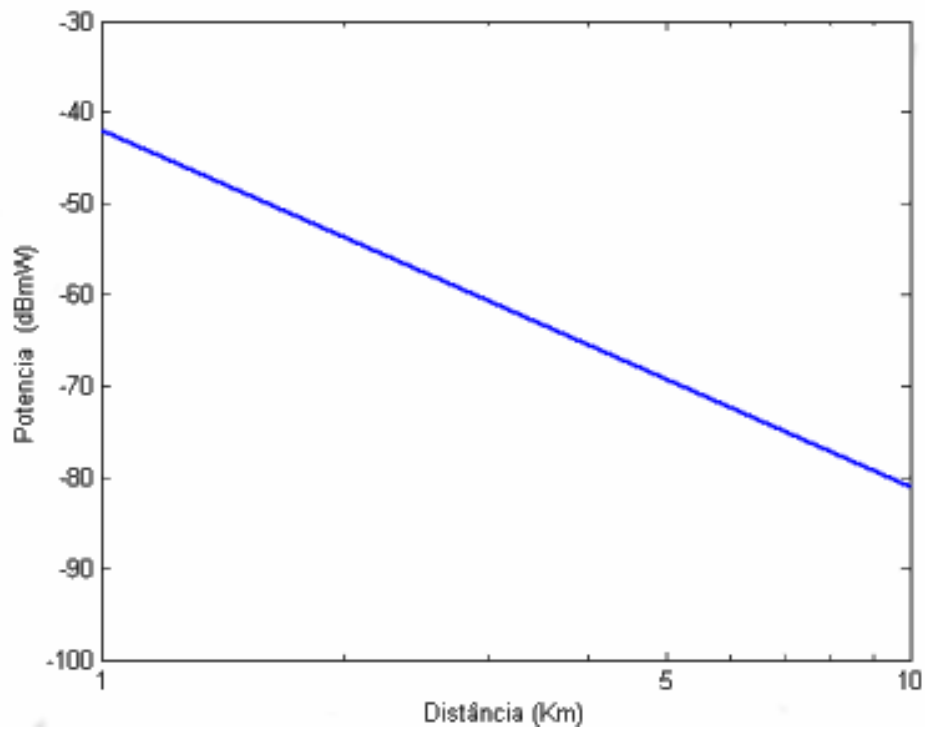


Figura 3.25 – Expoente de Perda de propagação para Geral Natal
 $\gamma = 3,84$ dB/dec

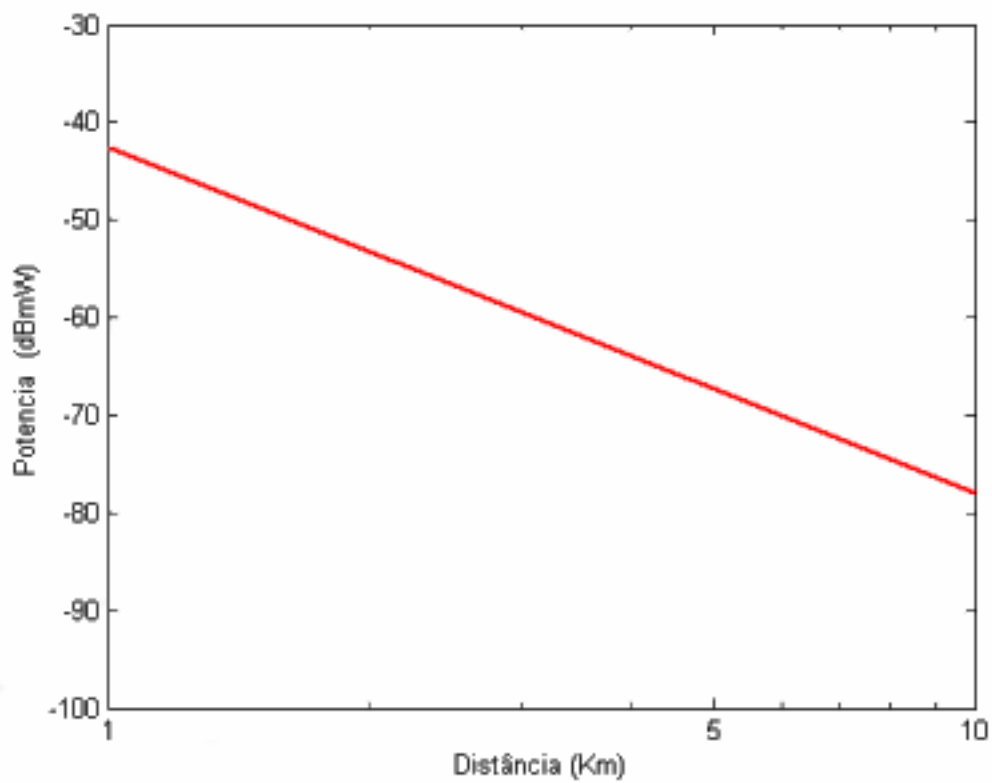


Figura 3.26 – Expoente de perda de propagação para Norte Natal.
 $\gamma = 3,69$ dB/dec

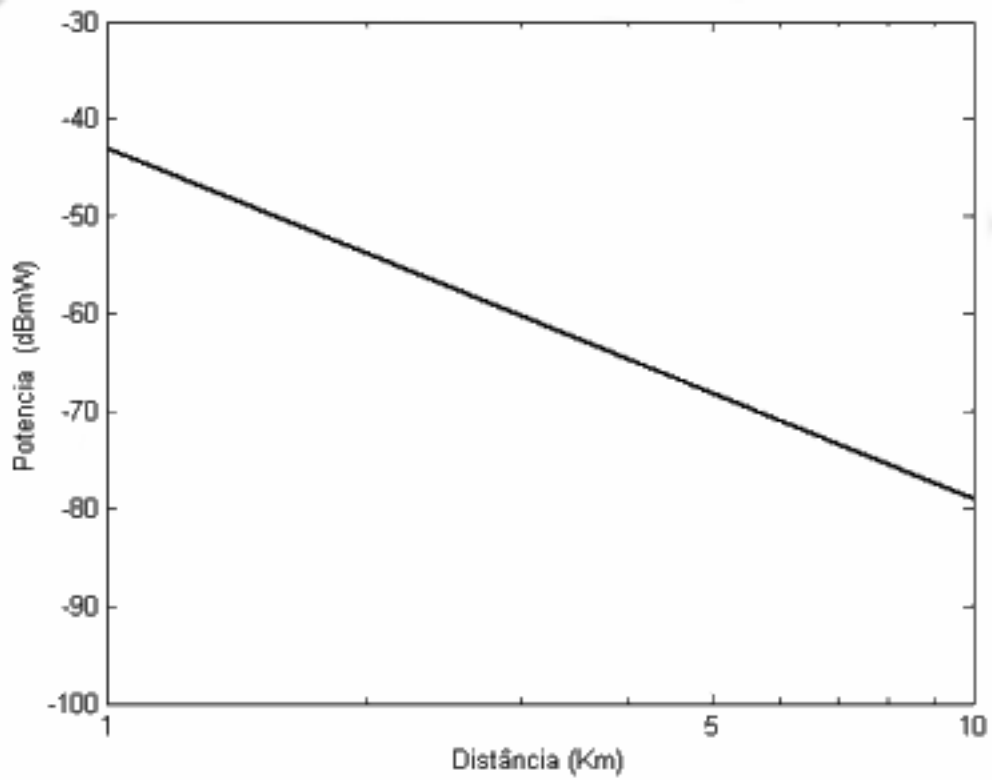


Figura 3.27 – Expoente de perda de propagação para Oeste Natal.
 $\gamma = 3,85$ dB/dec

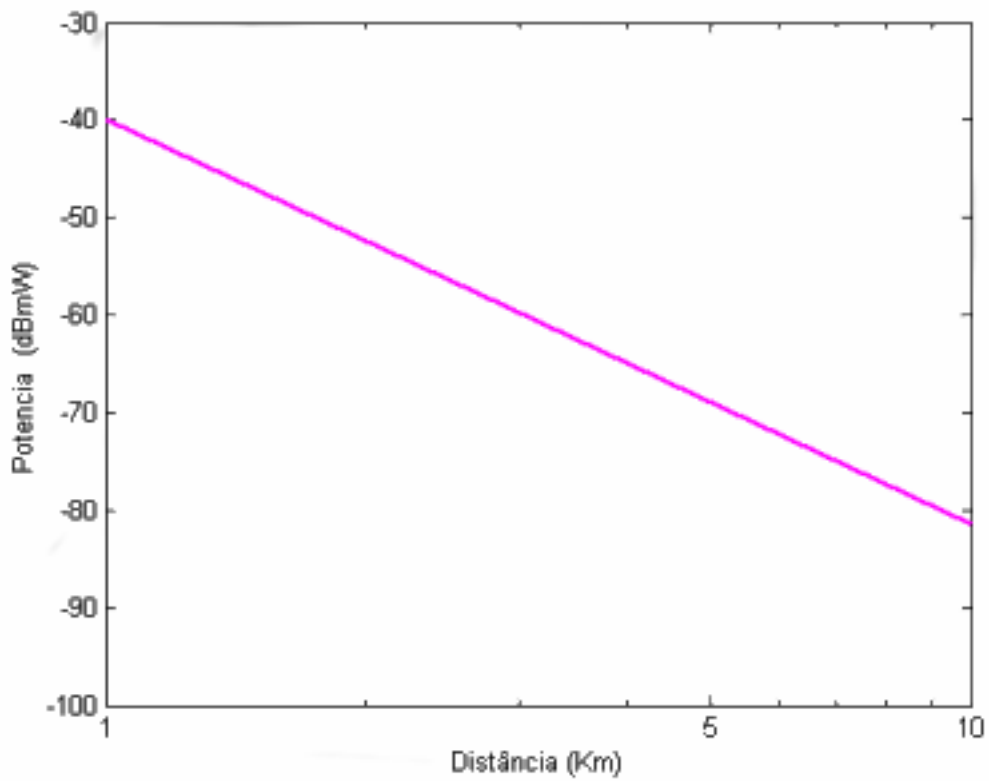


Figura 3.28 – Expoente de perda de propagação para Sul Natal.
 $\gamma = 4,00$ dB/dec

3.13 – Conclusão

Neste capítulo foram apresentados os principais modelos de propagação para o ambiente urbano da cidade de Natal. O conhecimento desses modelos é necessário para que se possa desenvolver, implementar e aplicar em programas computacionais dedicados à predição de propagação de ondas de rádio. Os modelos desenvolvidos de perda de percurso de propagação foram obtidos a partir de técnicas emergentes, como técnicas estatísticas, técnicas de redes neurais artificiais e modelos de trajetos aleatórios, além dos dados obtidos de medidas de campo para a potência e a altimetria do relevo em função da distância da estação base à unidade móvel para a área urbana e suburbana considerada.

A fim de validar os modelos apresentados, foram realizadas comparações de destes com os resultados de medidas e com outros modelos clássicos, observando-se boas concordâncias numéricas entre eles.

Portanto, pode-se afirmar que os modelos propostos aqui apresentados podem ser aplicados para o planejamento de sistemas de comunicações celulares, para a área urbana da cidade de Natal-RN.

CAPÍTULO 4

TÉCNICAS DE DIGITALIZAÇÃO DE RELEVO

4.1– Considerações gerais

As ondas eletromagnéticas se propagam na faixa de frequência de comunicações móveis preferencialmente através do mecanismo da visada direta. Entretanto, outras formas de mecanismos de propagação poderão ocorrer como a difração, a refração, a reflexão, etc. [22], [25]. Neste trabalho é considerada a topografia (relevo do terreno) para uma análise completa da cobertura por ondas de RF. Este processo consiste em transferir para um banco de dados, em formato conveniente, as informações relevantes sobre o relevo [37], [38], [39]. Estes dados serão úteis tanto para a técnica de comunicação ponto-a-ponto (enlace via rádio entre ERB's e a Central de Comando e Controle – CCC, por exemplo), como para uma predição de cobertura de uma ERB. Estes bancos de dados podem ser de vários formatos, dependendo do aplicativo que será usado para análise.

As informações de dados topográficos podem ser disponibilizadas nos modelos de armazenamentos de dados *Raster* ou *Vetorial* [37]. No *Modelo Raster* as informações são localizadas e disponibilizadas em uma matriz de células, onde cada célula armazena uma informação (altitude). As coordenadas estão implícitas no par ordenado linha-coluna. Já para o *Modelo Vetorial* as informações são armazenadas como pontos, linhas e planos em um sistema de referência que pode usar latitude/longitude, podendo-se acrescentar ainda informações sobre o tipo de relevo, tais como: florestas, mangues, rios, lagos, dunas, etc.

O Modelo Vetorial emprega o **Sistema de Informação Geográfica (SIG)** [37] que consiste no tratamento computacional dos dados geográficos coletados. O **SIG** armazena a geometria e os atributos dos dados que estão georeferenciados, isto é, localizados na superfície terrestre segundo uma projeção cartográfica. Os dados

são referenciados a uma posição real na superfície da terra, fornecidos em termos de latitudes e longitudes. Os dados tratados em geoprocessamento têm como principal característica não só o seu posicionamento, mas toda a diversidade de informação referentes a ele.

A característica de armazenar a geometria dos objetos geográficos e de seus atributos representa uma necessidade básica para o sistema **SIG**. Para cada objeto geográfico, este sistema necessita armazenar seus atributos e as várias representações gráficas associadas a ele. Um banco de dados modelado com o sistema **SIG** se constitui numa ferramenta robusta para análise de sinais RF.

De forma intuitiva, pode-se definir o termo *espaço geográfico* como uma coleção de localizações na superfície da Terra sobre a qual ocorrem os fenômenos geográficos. O espaço geográfico define-se, portanto, em função de suas coordenadas, sua altitude e sua posição relativa. Sendo um espaço localizável, o espaço geográfico é possível de ser cartografado. A questão em estudo estará definida pela sua localização geográfica e por outros fatores como clima, formação geológica, relevo, vegetação, construções, etc.

Um problema sempre controverso diz respeito às possibilidades e limitações do uso dos sistemas de informação geográfica. Os **SIGs** oferecem ferramentas para processar os dados ambientais, que permitem a expressão de procedimentos lógicos e matemáticos sobre as variáveis georeferenciadas. Esta diversidade de funções pode ser utilizada de forma pouco rigorosa. Devido ao grande número de dados que são manipulados, sem o cuidado de controlar o procedimento, muitos analistas não conseguem explicar os resultados obtidos e deles tirar conclusões objetivas. Por este motivo alguns pesquisadores preferem algumas vezes utilizarem dados de mapas em vez da poderosa ferramenta do sistema **SIG**.

A fim de evitar erros, o ideal é que o pesquisador possa testar seus experimentos e modelos levando em conta o potencial do banco de dados do **SIG**. O uso de SIGs para estudos em sinais de RF requer que duas pré-condições sejam satisfeitas: (1^a.) conhecimento do geoprocessamento e da região; (2^a.) metodologia de trabalho baseada no domínio das técnicas de RF. Muitas vezes uma análise subjetiva é necessária. Para estabelecer a metodologia, deve-se levar em conta a natureza essencialmente numérica das operações no computador. Uma simples transposição de técnicas tradicionais de análise para o ambiente do **SIG** é inadequada [30], [37]

Os métodos tradicionais de previsão de campo em comunicações móveis são oriundos de medição de campo, resultando como consequência o surgimento de um modelo empírico. Este foi o procedimento seguido neste trabalho.

4.2 – Dados Digitais de Elevação do Terreno

Por utilizar-se programas que processam banco de dados tipo *raster*, optou-se pelo banco de dados tipo DTED (Digital Terrain Elevation Data) [38], [39], [40], que foi desenvolvido para a aplicação e o suporte de operações militares pelo NIMA (National Imagery and Map Agency).

O banco de dados do tipo DTED é formado por uma matriz uniforme de dados da elevação de terreno. Após análise destes dados através de programas adequados, tem-se condições de verificar e visualizar o relevo, as elevações, a declividade e rugosidade de determinado terreno. Existem seis níveis DTED: DTED Level 0, DTED Level 1, DTED Level 2, DTED Level 3, DTED Level 4 e DTED Level 5 [39], [40].

O DTED Level 0 possui espaçamentos de arco de 30" (normalmente 1 Km) que são de acesso e domínio público, portanto, sem restrições. Neste caso, tem-se uma vaga idéia da topografia da área considerada. Para micro aplicações não é indicado, mas para macro aplicações apresenta precisão. Devido a sua reduzida resolução não se aplica em comunicações móveis, comunicação ponto-a-ponto nem tampouco para guiagem automática de mísseis, ou outras atividades militares e de segurança pública.

O DTED Level 1 é o ambiente básico para a solução de banco de dados para atividades militares, comunicações fixas e comunicações móveis que requerem a forma do ambiente, inclinação, elevação e rugosidade do terreno em formato digital. O DTED Level 1 é uma matriz uniforme de valores de elevação de terreno com espaçamento de 3' (três arcos de segundo) e aproximadamente 100 metros. As informações disponíveis estão contidas em mapas de escala de 1:250.000 de onde são extraídos os dados topográficos ou na falta destes se utilizam mapas em escala de 1:100.000 ou imagens obtidas por radar de um veículo espacial [39], [40].

O DTED Level 2 com resolução de até 30 metros de espaçamento deverá estar disponível ao público em 2006 [41]. Sua comercialização deverá ser cara e limitada, por motivos estratégicos e militares. Sua informação equivale as que existem em mapas de escala de 1:50.000.

Na Tabela 4.1 mostrada abaixo, são descritas as características principais dos sistemas DTED [39], [40].

Tabela 4.1 - Características dos vários DTEDs

DTED Level 0	~ 1000 m de espaçamento	-----
DTED Level 1	~ 100 m de espaçamento	1.442.401 pontos (*)(**)
DTED Level 2	~ 30 m de espaçamento	12.967.201 pontos
DTED Level 3	~ 10 m de espaçamento	144.024.001 pontos
DTED Level 4	~ 3 m de espaçamento	1.296.072.001 pontos
DTED Level 5	~ 1 m de espaçamento	11.660.000.000 pontos

(*) matriz formada por 1201 X 1201 pontos = 1.442.401

(**) 2.889.214 bytes

Como o raio da terra tem em torno de 6.370Km, sua circunferência é aproximadamente igual a 40.023Km para 360⁰; logo, 10' = 18,5 Km; 60' = 1⁰ = 111 Km; uma componente de quadrícula de mapa de 1⁰ x 1⁰ corresponde, a 111 Km x 111 Km = 12.321 Km². Na Tabela 4.2 são mostradas os espaçamentos e pontos dos DTEDs.

Tabela 4.2 – Espaçamento e pontos dos DTEDs.

DTED LEVEL	Espaçamento	# Pontos
1	100m	90.000
2	30m	810.000
3	10m	5.000.000
4	3m	21.250.000
5	1m	506.250.000

Acredita-se que no futuro próximo o melhor DTED será o de melhor resolução. De forma reduzida a Tabela 4.3 mostra outras características dos DTED [39], [40].

Tabela 4.3 – Espaçamento de tamanho de quadrícula dos DTEDs

DTED LEVEL	Espacejamento	Distancia	Linha x Coluna	Tamanho da quadrícula
1	3"	~100m	1200 x1200	1 x 1 grau
2	1"	~30m	3600 x3600	1 x 1 grau
3	0,3333"	~10m	900 x900	5 x 5 minutos
4	0,1111"	~3m	540 x 540	1 x 1 minutos
5	0,0370"	~1m	810 x 810	30 x 30 seg.

4.3 – O DTED Empregado

Neste trabalho, foi usado o **DTED Level 1** para digitalização do relevo. Este tem a característica de ter o espaçamento de 3" e por isto também denominado "Dados de três segundos". Estes dados se referem às elevações da terra medidas, em metros, acima do nível médio do mar (Above Mean Sea Level – AMSL), com matrizes contendo pontos de elevação de dados a cada 3" de Latitude (Sul para o Norte) e de cada 3 a 18 segundos de Longitude (Leste para o Oeste). Isto é, dependendo da distância longitudinal do ponto à linha do equador. No equador, 3" de latitude, leste ou oeste, equivalem a aproximadamente 90m. O mesmo se pode dizer com relação à longitude norte, ou sul. Note que nos pólos um afastamento de 3" de longitude é infinitamente pequeno [39], [40].

O DTED Level 1 opera com blocos de 1°. São formados e agrupados de tal modo que no geral se tenha a região, ou local de interesse.

Cada bloco de 1° é arquivado numa área fechada de um arco de 1° Norte-Sul e 1° Leste-Oeste. Os dados são coletados no seu início no extremo Sudoeste e continua para o Norte em um conjunto de dados. A Figura 4.1 ilustra uma matriz de 1201 x 1201 pontos que correspondem a um bloco de 1° por 1° e procedimento de varredura.

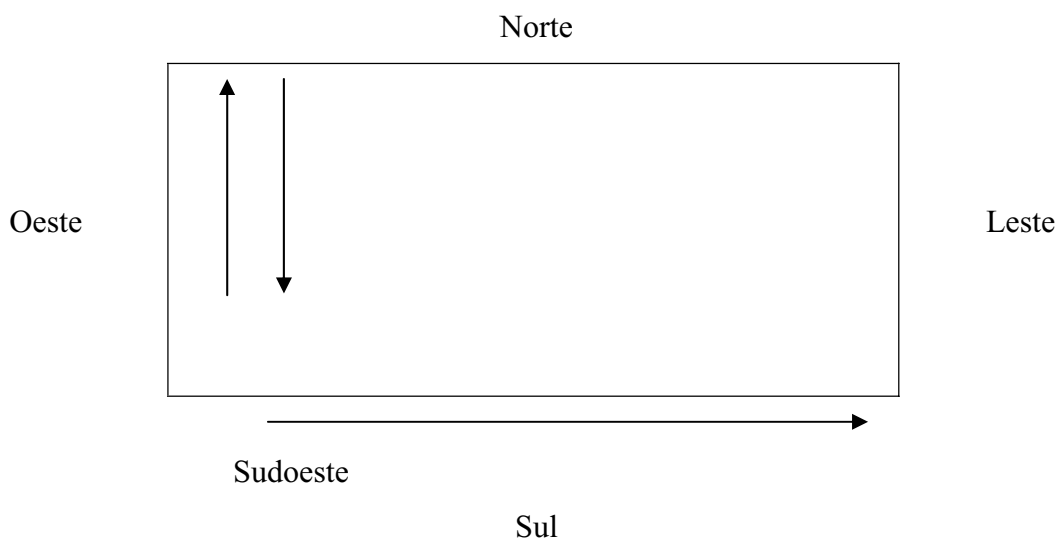


Figura 4.1 – Ilustração de uma matriz de 1201 x 1201 pontos correspondendo a 1^o por 1^o com início de varredura pelo sudoeste e na coluna na direção norte.

Cada uma das colunas de dados possui 1201 pontos (elevações) com 3" de intervalo. O mesmo ocorre para a linha, também com 1201 pontos. Seguidamente, o perfil Sul-Norte é armazenado na seqüência Oeste-Leste. Como se sabe, a distância Oeste-Leste é definida por um arco de segundo de longitude que decresce com a distância da linha do equador. Desta maneira, como também o espaçamento Sul-Norte, é feito em seis zonas distintas, caso necessário, como mostrado na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Arquivos em bytes dos DTEDs em função da latitudes

ZONAS LONGITUDINAIS				
Zona	Latitude N ou S	Espaçamento	Pontos de Arquivo	Arquivo em Bytes
I	0 ^o a 50 ^o	3"	1201 ²	2.899.214
II	50 ^o a 70 ^o	6"	601 ²	1.450.814
III	70 ^o a 75 ^o	9"	401 ²	968.014
IV	75 ^o a 80 ^o	12"	301 ²	726.614
V	80 ^o a 90 ^o	18"	201 ²	458.214

O valor do arquivo em bytes é igual ao número de pontos totais do arquivo (1201 x 1201) adicionado aos bytes do cabeçalho. O cabeçalho é necessário para cada grupo de 1201 x 1201 pontos no caso de DTED 1 e com latitudes entre 0° e 50° N ou S.

Nele está incluída a informação de Latitude, Longitude, Hemisfério, Data, Elevação mínima e máxima, etc. O cabeçalho tem 12 Bytes; 1201 pontos = 1201 x 2 + 12 (cabeçalho) = 2414 bytes, isto na vertical. Como são 1201 pontos na horizontal, tem-se 1201 x 2414 = 2.899.214 bytes [39], [40].

4.4 – A Estrutura do Diretório e do Sub-Diretório

O DTED é armazenado em arquivos em um determinado diretório e nele ramificam-se sub-dietórios que correspondem aos graus que foram digitalizados associados a determinadas latitudes e determinadas longitudes. O diretório principal é denominado DTED sem nenhuma extensão.

Neste diretório deverá haver um sub-diretório para cada grau de longitude com quatro caracteres, excluindo-se a extensão. Por exemplo, para um sub-diretório e034 significa que o mesmo contém os arquivos entre 34° e 35° de longitude leste. Analogamente, se ele for o w034 terá informações contidas entre 33° e 34° de longitude oeste.

Têm-se, então, os seguintes diretórios e subdiretórios para o caso do Rio Grande do Norte:

```
C>DTED>W035>S07.DT1
      W036>S05.DT1
          S06.DT1
          S07.DT1
      W037>S05.DT1
          S06.DT1
          S07.DT1
      W038>S05.DT1
          S06.DT1
          S07.DT1
      W039>S06.DT1
          S07.DT1
```

Os programas dedicados irão então ao Diretório DTED para captação dos dados necessários [42]. Na Figura 4.2 tem-se uma quadrícula completa de 1° por 1° que é formada por 4 blocos de 30' por 30' que por sua vez é formada por 6 blocos de 10' por 10'.

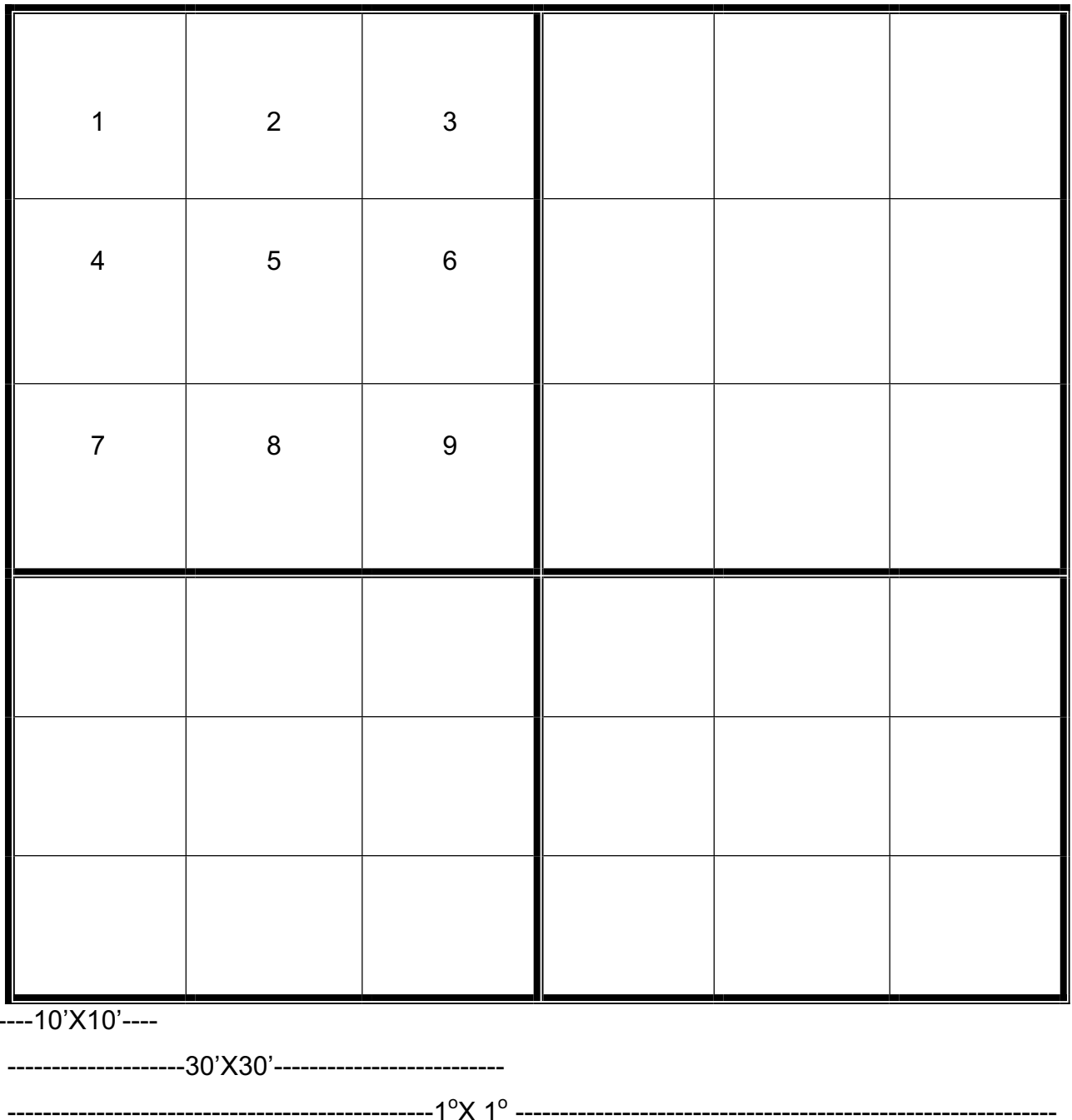


Figura 4.2 – A quadrícula de 1° X 1°.

pontos. Como se pode verificar as curvas de nível disponíveis não são suficientes para preencher o banco de dados. Para tal, é preciso que se desenvolva um algoritmo de interpolação e extrapolação de maneira que os dados faltosos sejam preenchidos [43], [44], [45].

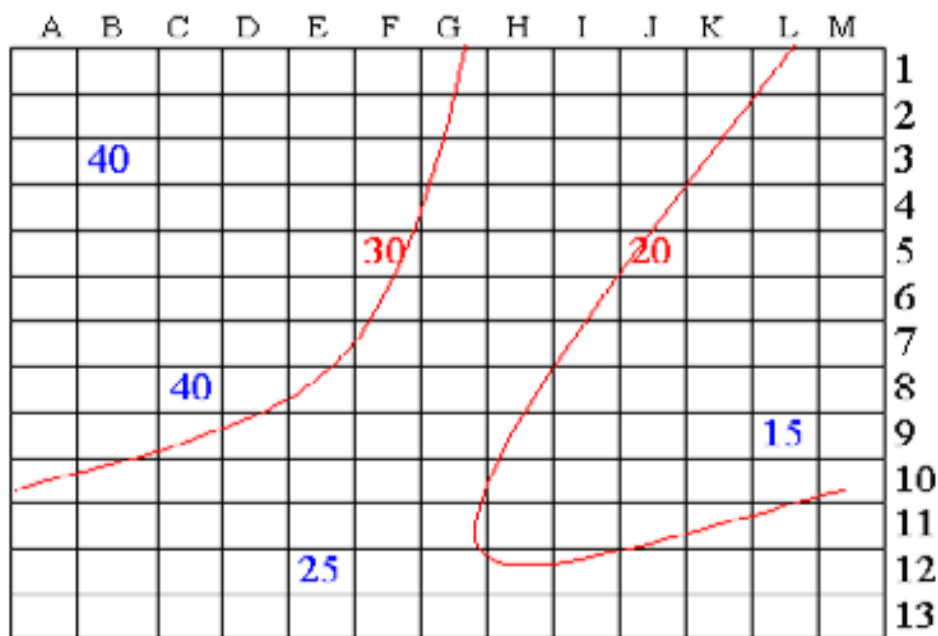


Figura 4.4 – Exemplo de curvas de nível, pontos relevantes e pontos para preenchimento.

Em uma captação hipotética, tem-se como valores relevantes para B3=40m; C8=40m; E12=25m; L9=15m e curvas de nível com valores de 20 metros em M11; L12; K12; J12; J13; I13; H13; G11; G12; G13; H11; H10; H9; I8; I7; I6; J6; J5; J4; K4; K3; K2; L2 e L1; 30 metros em A11; B11; B11; C10; D10; D9; E9; E8; F7; F6; F5; G4; G3; G2 e G1.

Todos os valores não indicados deverão ser cotados e preenchidos através de algoritmo. Após o preenchimento de cada prancha de 10' X 10', elas serão agrupadas (em número de 9) até formar um mapa de 30' X 30' (Figura 4.2). Quatro destes (conjuntos de nove) fornecem uma quadrícula de 1° X 1° montados e ajustados pelo padrão DTED LEVEL 1, de tal modo que o programa de captação das elevações e previsão de campo saiba onde encontrar o relevo em função da Latitude e Longitude especificada.

Matematicamente e sob determinadas condições, o traçado de oito radiais a partir do centro de emissão formando 45° entre elas é suficiente para se

definir e prever o valor do campo ou potência a uma determinada distância. Entretanto com o banco de

dados digitalizado e sua captura, em alguns segundos, pode-se fazer estes cálculos de 1° em 1°, perfazendo um total final de 360 radiais a partir do ponto considerado.

4.6 – Procedimentos para Preenchimento do Bando de Dados

Pode-se usar a técnica do Mapeamento [43], das Redes Neurais [28], [44], [46], [47] ou Krigeagem [37], [45], para preenchimento dos dados faltosos, por aproximação e/ou estimativa. Através da Figura 4.4 percebe-se a existência de pontos relevantes de elevação e de curvas de nível. Entretanto, para se ter uma idéia mais real do relevo é necessário o preenchimento dos pontos faltosos.

4.7 - Mapeamento

O mapeamento [43] é um processo interativo para cálculo estimativo de valores não conhecidos em função de valores fixados, obtidos ou colhidos por outros processos, seja ele calculado ou compilado. Como tem-se uma matriz de 1201 X 1201 pontos e curvas e pontos relevantes limitados pela própria estrutura e confecção dos

mapas em escala de 1:100.000 (Figuras 4.1, 4.2, 4.3, e 4.4), os pontos não cotados

deverão ser preenchidos. Leva-se em conta a cota inicial e a cota final e toma-se em consideração o numero de pontos existentes no intervalo podendo-se, assim, prever-se o valor das cotas faltosas. Os valores em todos os sentidos (Norte-Sul e Leste-Oeste) devem ser apurados e considerados. A Figura 4.5 ilustra as quadrículas referenciais para o Rio Grande do Norte, na digitalização no formato DTED.

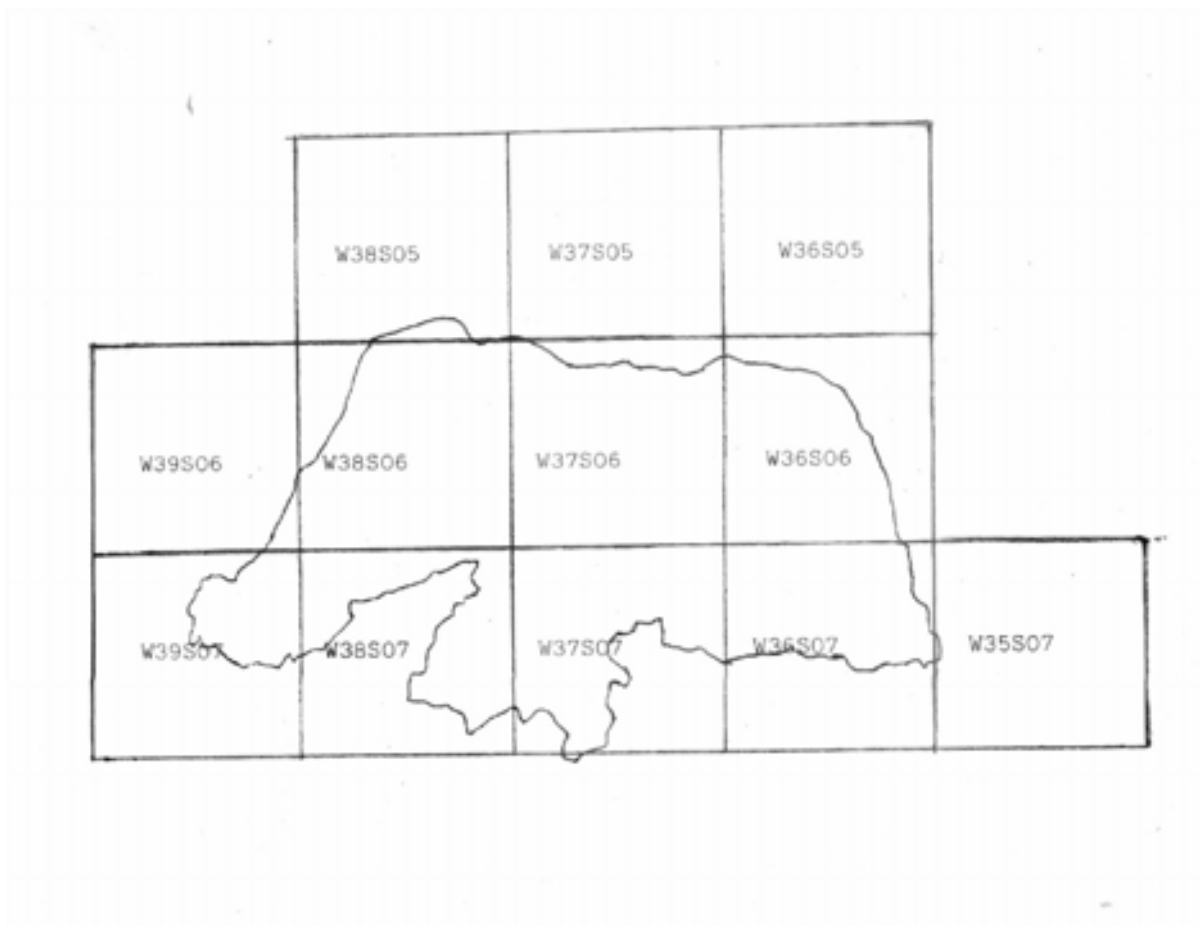


Figura 4.5– Quadrículas do Rio Grande do Norte para digitalização no formato DTED.

Na Figura 4.6 está ilustrado o mapa do relevo da região Norte e Sul de Natal-RN, obtido de dados digitalizados no padrão DTED LEVEL1. Na Figura 4.7, tem-se um exemplo da área de cobertura da cidade de Natal baseado no relevo no padrão DTED LEVEL1. Na Figura 4.8 tem-se os níveis de potência em diversas regiões em função de características de terreno e de emissão utilizando-se de ferramentas de previsão de RF para validar o banco de dados do relevo.

Mapa de relevo

Alt.máx=86m

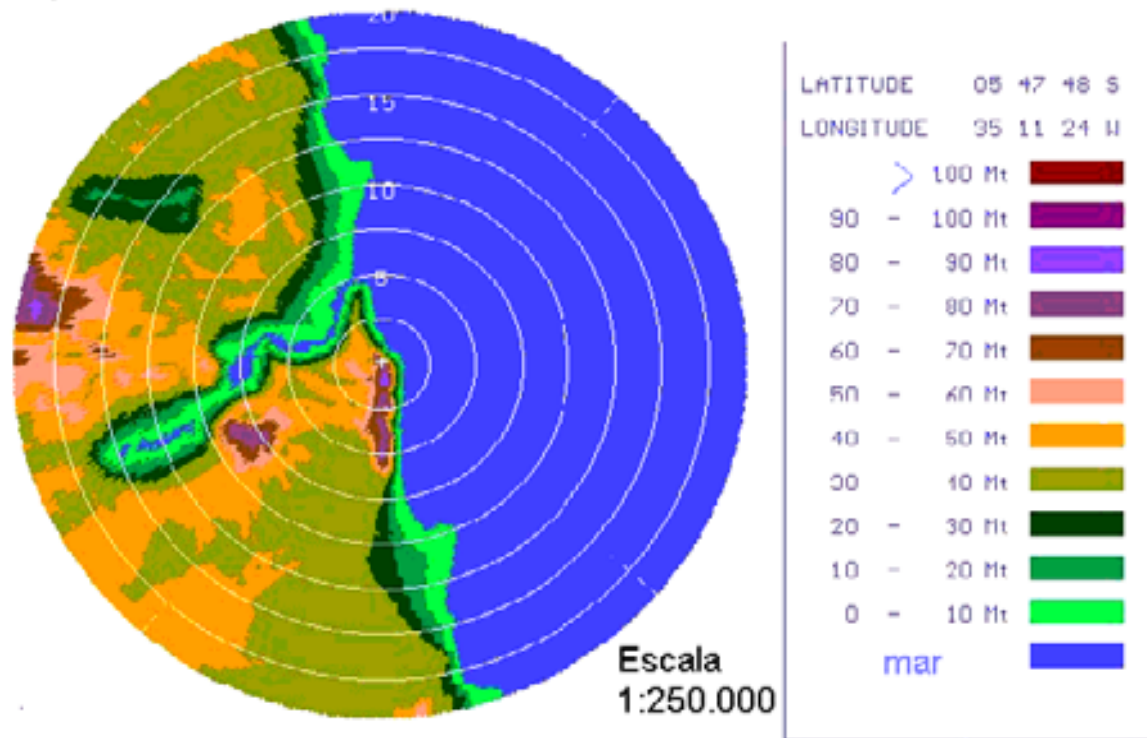


Figura 4.6– Mapa de relevo para Natal-RN.

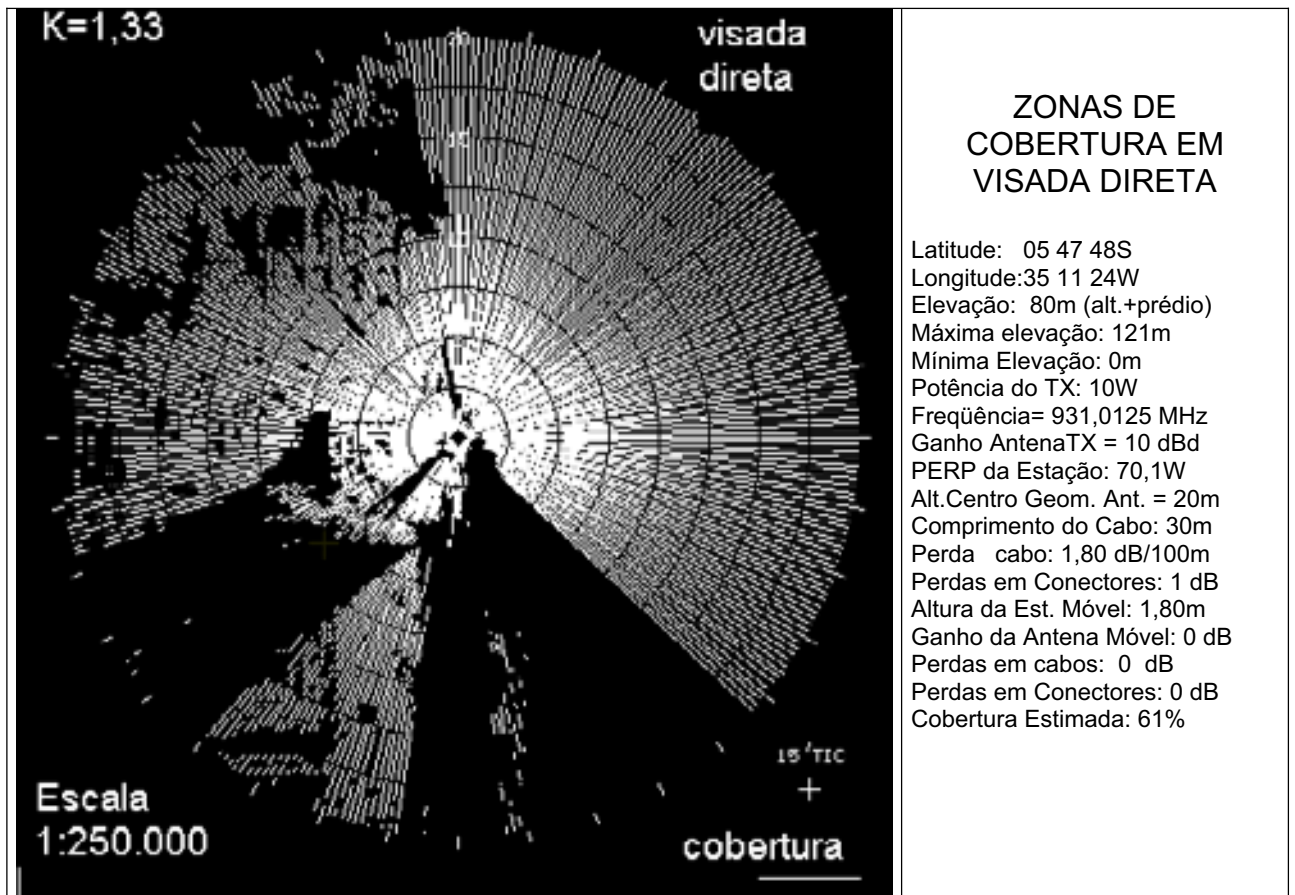


Figura 4.7 – Área de cobertura a partir de um ponto de emissão baseado no relevo no padrão DTED LEVEL 1 centrado em Natal-RN.

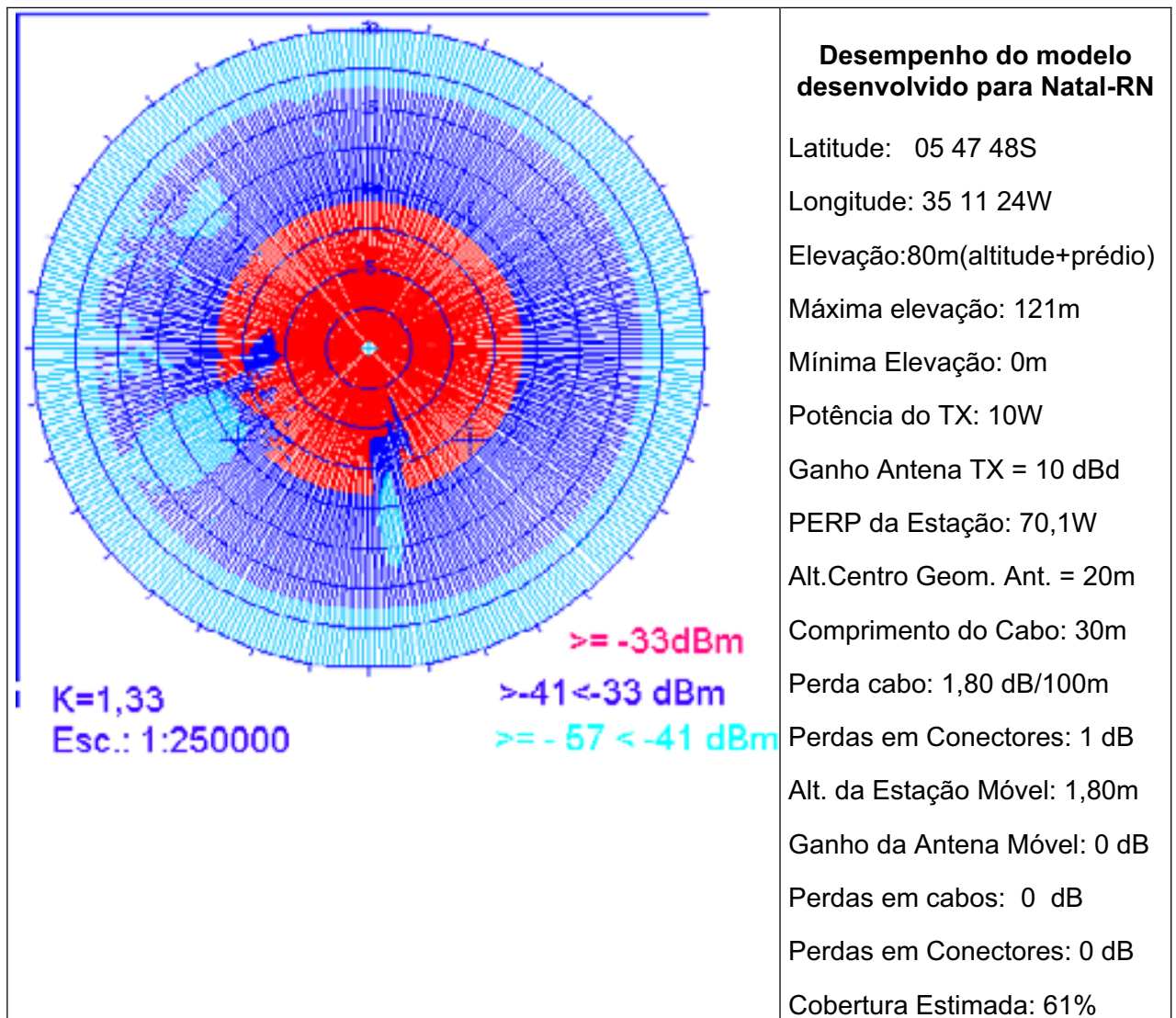


Figura 4.8– Exemplo de área de cobertura em função do nível de potência recebido em função de banco de dados digitalizado no padrão DTED LEVEL 1 centrado em Natal-RN.

4.8 – Variáveis Regionalizadas (Krigagem)

A estatística utiliza-se de parâmetros como o desvio padrão e a média para representar um fenômeno e se baseia, principalmente, na hipótese de que as variações de um local para outro são aleatórias.

Portanto, pode-se afirmar que somente as informações dadas pela variância seriam insuficientes para explicar o fenômeno. Para resolver este problema, uma nova variável deveria ser incluída no estudo: a distância entre as observações. Surge então o conceito da geoestatística, que leva em conta num sistema mais complexo a localização geográfica e a dependência espacial.

Daniel G. Krige (daí a denominação krigagem), em 1951, chegou a estas observações e Matheron (em 1963 e 1971) desenvolveu a teoria das variáveis regionalizadas, a partir dos fundamentos da geoestatística [37], [45].

Variável regionalizada é uma função numérica com distribuição espacial, que varia de um ponto a outro com continuidade aparente, mas cujas variações não podem ser representadas por uma função matemática simples.

Esta teoria, de variáveis regionalizadas, pressupõe que esta variável deve ser expressa pela soma de três componentes distintas:

- (1^a.) Uma componente estrutural, associada a um valor médio constante ou a uma tendência constante;*
- (2^a.) Uma componente aleatória, espacialmente correlacionada;*
- (3^a.) Um erro residual, representando o ruído aleatório.*

Baseado nesta teoria é possível o preenchimento dos vazios da grade de altitudes faltosas (Figura 4.4).

4.9 – Uso das Redes Neurais

As redes neurais artificiais (Capítulo 5) podem ser empregadas na técnica anterior. Através do treinamento dessas redes é possível o preenchimento dos dados faltosos. Alocando-se numa rede neural os dados conhecidos e a tendência de crescimento e decréscimo dos valores dos mapas é possível se prever com grande precisão os valores não preenchidos [28], [44], [46], [47].

4.10 – Conclusão

Neste capítulo foi mostrada a aplicação da técnica de digitalização de relevo, que é capaz de gerar um banco de dados em formato pré-definido de dados digitalizados do relevo. Nos procedimentos efetuados, obteve-se a coleta de pontos relevantes e o preenchimento dos dados desconhecidos. Com isto, obtém-se o relevo digitalizado que é de importância fundamental para o planejamento celular e a conseqüente comparação com outras técnicas.

A predição da área de cobertura e contornos de relevo foi obtida através de uma ferramenta de planejamento de sinais de RF, o que comprovou a precisão da altimetria, bem como a predição do campo comparado com os modelos tradicionais, com o modelo estatístico proposto nesta tese e com o modelo da rede neural artificial.

CAPÍTULO 5

REDES NEURAIS ARTIFICIAIS: CARACTERÍSTICAS E APLICAÇÕES EM MODELOS DE PREDIÇÃO DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS DE RÁDIO

5.1 – Introdução às Redes Neurais Artificiais (RNAs)

Uma Rede Neural Artificial (RNA) [28], [44], é um sistema de computação baseado no processamento de informações encontradas nos neurônios reais (biológicos) e nas características de suas interconexões. Em termos operacionais, essas redes são sistemas de computação paralela que podem ser implementados tanto em hardware quanto em software, sendo que os elementos de processamento individualmente têm capacidades limitadas. Esses elementos de processamento básicos são os chamados neurônios artificiais, que imitam de alguma forma o processamento de informação realizado por um neurônio biológico.

Uma RNA se assemelha ao cérebro humano em relação a dois aspectos básicos:

- O conhecimento é adquirido pela RNA através de um processo de aprendizagem.
- As transmitâncias das conexões entre os neurônios, conhecidos como pesos sinápticos, que estão submetidos ao fluxo de informações através da rede, são empregadas para armazenar o conhecimento.

A técnica usada para realizar o processo de aprendizagem, emprega um *algoritmo de aprendizado*, cuja função é atualizar os sinápticos de uma RNA.

A teoria das RNAs nos mostra claramente que esses sistemas de otimização são não-lineares, característica que os tornam adequados para analisar fenômenos físicos reais.

5.2 – Breve Histórico das RNAs

Devido à importância das aplicações das RNAs em Engenharia Elétrica, descreve-se a seguir alguns fatos históricos importantes neste novo campo de pesquisa [28].

- Década de 40: Neurônio de McCulloch e Pitts: uma proposta para a descrição matemática de cálculos lógicos com base nas estruturas neurais biológicas.
- Década de 50: Em 1956 na 1ª Conferência Internacional de Inteligência Artificial foi apresentado um modelo de rede neural artificial pelo pesquisador Nathaniel Rochester, da IBM. Em 1959, foi demonstrada a rede adaptativa Adaline, que pode ser vista como um modelo linear dos principais mecanismos de processamento de informação e adaptação presentes no neurônio biológico.
- Década de 60: Perceptron de Rosenblatt: modelo neural não linear e adaptativo que permite expressar os processamentos representados no modelo de McCulloch e Pitts e incorporar um algoritmo de aprendizado supervisionado bastante eficaz. Em 1969, Marvin Minsky e Seymour Papert publicaram um livro chamado “Perceptrons”, em que vários aspectos teóricos e limitações do Perceptron de Rosenblatt são formalizados e estudados.
- 1982: John Hopfield apresentou um sistema neural artificial capaz de armazenar nas interconexões entre os neurônios informações complexas, como imagens, por exemplo. Esta proposta teve um impacto importante no ressurgimento e crescimento nas décadas seguintes do interesse em RNAs para a modelagem e emulação de aspectos da inteligência e percepção humanas.
- 1994: Ocorreu o 1º Congresso de Redes Neurais no Brasil. Atualmente, pelo menos dois congressos brasileiros específicos em redes neurais ocorrem anualmente, além de inúmeros eventos internacionais e eventos nacionais de abrangência mais geral que contam com seções específicas em redes neurais.

5.3 – Modelo Matemático de um Neurônio Artificial

A unidade de processamento de informações de uma RNA é chamada de *neurônio artificial*. A Figura 5.1 ilustra o esquema para o modelo matemático de um neurônio artificial.

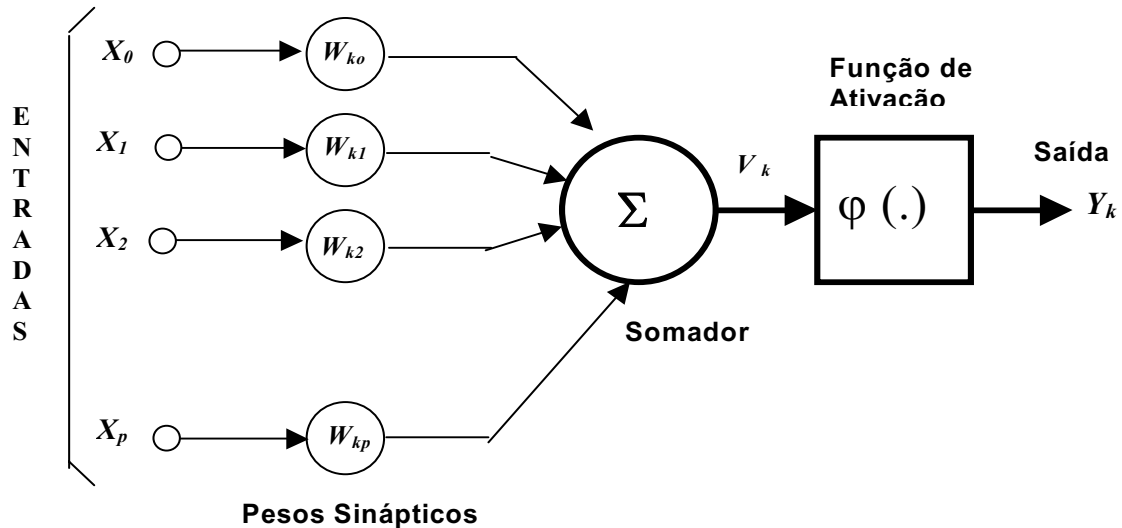


Figura 5.1 – Diagrama de blocos de um neurônio artificial.

Nesta tese, o modelo matemático adotado para k-ésimo neurônio de uma RNA é o *modelo do algoritmo backpropagation* [28], que pode ser descrito através das seguintes expressões (ver Figura 5.1)

$$V_k = \sum_{j=0}^p w_{kj} x_j \quad (5.1)$$

$$y_k = \varphi(v_k) \quad (5.2)$$

$$\varphi(v_k) = a.tanh(b.v_k) \quad (5.3)$$

onde x_0, x_1, \dots, x_p são os sinais de entrada, $w_{k0}, w_{k1}, \dots, w_{kp}$ são os pesos sinápticos do k -ésimo neurônio, v_k é o nível da ativação do neurônio, $\varphi(\cdot)$ é a função de ativação e y_k é o sinal de saída do neurônio. As constantes a e b dependem da faixa da variação dos sinais de entrada, $[x_0, x_k]$.

5.4 – Redes Neurais em Camadas Progressivas (Feedforward Multilayer Perceptrons - FMLP)

Uma RNA do tipo FMLP é formada por um conjunto de entradas que constituem a *camada de entrada* (do inglês *input layer*), uma ou mais *camadas escondidas* (*hidden layer*), e uma *camada de saída* (do inglês *output layer*). Com exceção da camada de entrada, todas as outras são constituídas por neurônios e, portanto apresentam esforço computacional na operacionalização [28].

O número de camadas escondidas e o número de neurônios em cada uma delas é encontrado experimentalmente em função do tipo de conjunto de dados a ser aprendido.

O número de nós de entrada e de neurônios na saída depende do tipo de sinal de entrada e de saída desejados. A rede é dita ser *feedforward* porque a saída dos neurônios em cada camada sempre se conectam as entradas dos neurônios da camada seguinte. Como exemplo, ilustra-se na Figura 5.2 um FMLP com arquitetura 4-2-1, isto é, quatro nós de entrada, dois neurônios na camada escondida e 1 neurônio de saída.

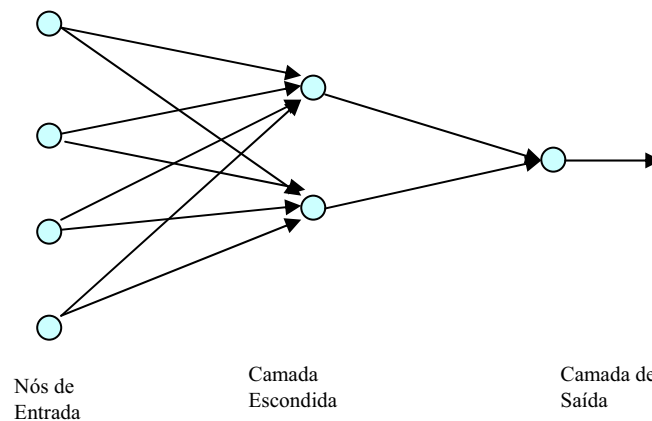


Figura 5.2 – Rede FMLP com arquitetura 4-2-1.

A função da camada escondida é influir na relação entrada/saída da rede considerada. Uma RNA com uma ou mais camadas escondidas é capaz de extrair parâmetros estatísticos de alta ordem do processo estocástico do qual a rede está tentando adquirir conhecimento.

As redes FMLP têm sido aplicadas na solução de diversos problemas da técnica de otimização denominada de *treino supervisionado*. O algoritmo mais empregado é *backpropagation*, que se baseia no aprendizado ERRO-CORREÇÃO. Este algoritmo emprega os princípios do LMS (do inglês *Least Mean Square*) [28].

5.5 – Procedimento Computacional para o Algoritmo *Backpropagation*

Na implementação computacional do algoritmo *backpropagation*, foi usado para a simulação o “*Neural Network Toolbox*” do MatLab® [44], [46].

1º. Procedimento – Denominado de *passo direto* (do inglês *forward pass*). Neste procedimento, os pesos sinápticos permanecem inalterados em toda a rede e os sinais são propagados da entrada da rede para a saída de neurônio a neurônio. O sinal que resulta na saída do neurônio j é computado como

$$y_j = \varphi(v_j(n)) \quad (5.4)$$

onde $v_j(n)$ é o nível de ativação interna do neurônio j definido como

$$v_j(n) = \sum_{i=0}^P w_{ji}(n) y_i(n) \quad (5.5)$$

sendo P o número total de entradas aplicadas ao neurônio j , $w_{ji}(n)$ é o peso sináptico conectando o neurônio i ao neurônio j e $y_i(n)$ é o sinal de entrada do neurônio j ou equivalentemente o sinal na saída do neurônio i .

2º. Procedimento – Denominado de *passo reverso* (do inglês *backward pass*), que começa na camada de saída, passando os sinais de erro na direção esquerda da rede (de volta para entrada), de camada em camada, e recursivamente computando os gradientes locais para cada neurônio. Este processo recursivo permite que sejam operadas correções nos pesos sinápticos [28], [44].

5.6 – As Condições Iniciais

No Capítulo 3, obteve-se uma curva de campo em função da distância cuja inclinação caracterizou a cidade de Natal, ou cidades semelhantes, cujo valor aproximou-se do que se chama de “suburbano” na literatura especializada. Resolve-se este problema agora com o uso de RNAs, cujos resultados de simulação são comparados com outras técnicas.

A seguir são descritos os procedimentos básicos realizados durante as campanhas de medições na área urbana de Natal.

Procedimento 1: foram feitas medições em 1 Km, 5Km e 10 Km em torno de um ponto central de transmissão com características fixas. Neste procedimento foram realizadas oito medições a 1 km e a 5 km, e 10 medições a 10 km. Com isto, calculou-se um valor do mínimo erro médio quadrático das medições em cada distância (Ver Capítulo 3).

Procedimento 2: Como cada radial tem valores altimétricos diferentes e que não foram levados em consideração nas medições, então foram realizadas medições em 30 pontos diferentes dos iniciais, sendo 10 com distância de 1Km; 10 com distância de 5Km e 10 com distância de 10 Km.

Para exemplificar a aplicação destes procedimentos, pode-se considerar um sistema de transmissão com as seguintes características: $P_t = 40 \text{ W}$ (16,02 dBW); Perdas totais (conectores $\cong 1 \text{ dB}$ e no cabo $\cong 2,13 \text{ dB}$), totalizando 3,13 dB. Portanto, a potência final fica igual a $(16,02 \text{ dBW} - 3,13 \text{ dB}) = 12,89 \text{ dBW} = 19,45 \text{ W}$, antes da entrada na antena de 10 dBd de ganho. Altura da antena, $h_1 = 59 \text{ m}$; ganho da antena, $g_t = 10 \text{ dB/dipolo}$ [Ver Apêndice B].

Para a medição na unidade móvel, tem-se os seguintes parâmetros: Altura da antena, $h_2 = 1,80 \text{ m}$ (10 ft); ganho da antena receptora, $g_m = 0 \text{ dB/dipolo}$; frequência de operação, $f = 931,0125 \text{ MHz}$. Foram considerados ainda os valores de altimetria da medição de campo de todas as radiais. No ponto inicial (0 Km) em todas as radiais a antena estava a 92m de altura (33m da elevação + 59m (edifício + antena)).

Foi aplicada uma RNA treinada com as características de transmissão e do terreno, levando-se em conta uma potência medida na recepção com valores de campos nos pontos a 1Km; 5 Km e 10 Km com um novo relevo topográfico. Portanto, tem-se os seguintes casos a serem analisados:

Caso 1: Características técnicas \Rightarrow medições \Rightarrow traçado de curva \Rightarrow comparações através de ferramenta computacional de RF e uso de relevo digitalizado.

Caso 2: Características técnicas \Rightarrow relevo topográfico (extraídos do Caso 1) + outros pontos de relevo + medições (caso 1) \Rightarrow Rede Neural \Rightarrow medições previstas \Rightarrow plotagem de nova curva \Rightarrow comparação com medições.

VALORES MÁXIMOS E MÍNIMOS DE CAMPO PARA TREINAMENTO DA RNA

Radial de 1 Km: \implies [$P_{\max} = -14$ dBmW e $P_{\min} = -54$ dBmW]

Radial de 5 Km: \implies [$P_{\max} = -54$ dBmW e $P_{\min} = -83$ dBmW]

Radial de 10 Km: \implies [$P_{\max} = -67$ dBmW e $P_{\min} = -101$ dBmW]

Na Figura 5.3, é ilustrado o diagrama de bloco para a operacionalização do modelo da rede neural para a perda de propagação na área urbana de Natal. Nas Tabelas 5.1, 5.2 e 5.3 tem-se a altimetria com as respectivas potências medidas. Nas Tabelas 5.4, 5.5 e 5.6, tem-se a altimetria para valores de outras radiais e os campos que deverão ser calculados após o treinamento da RNA.

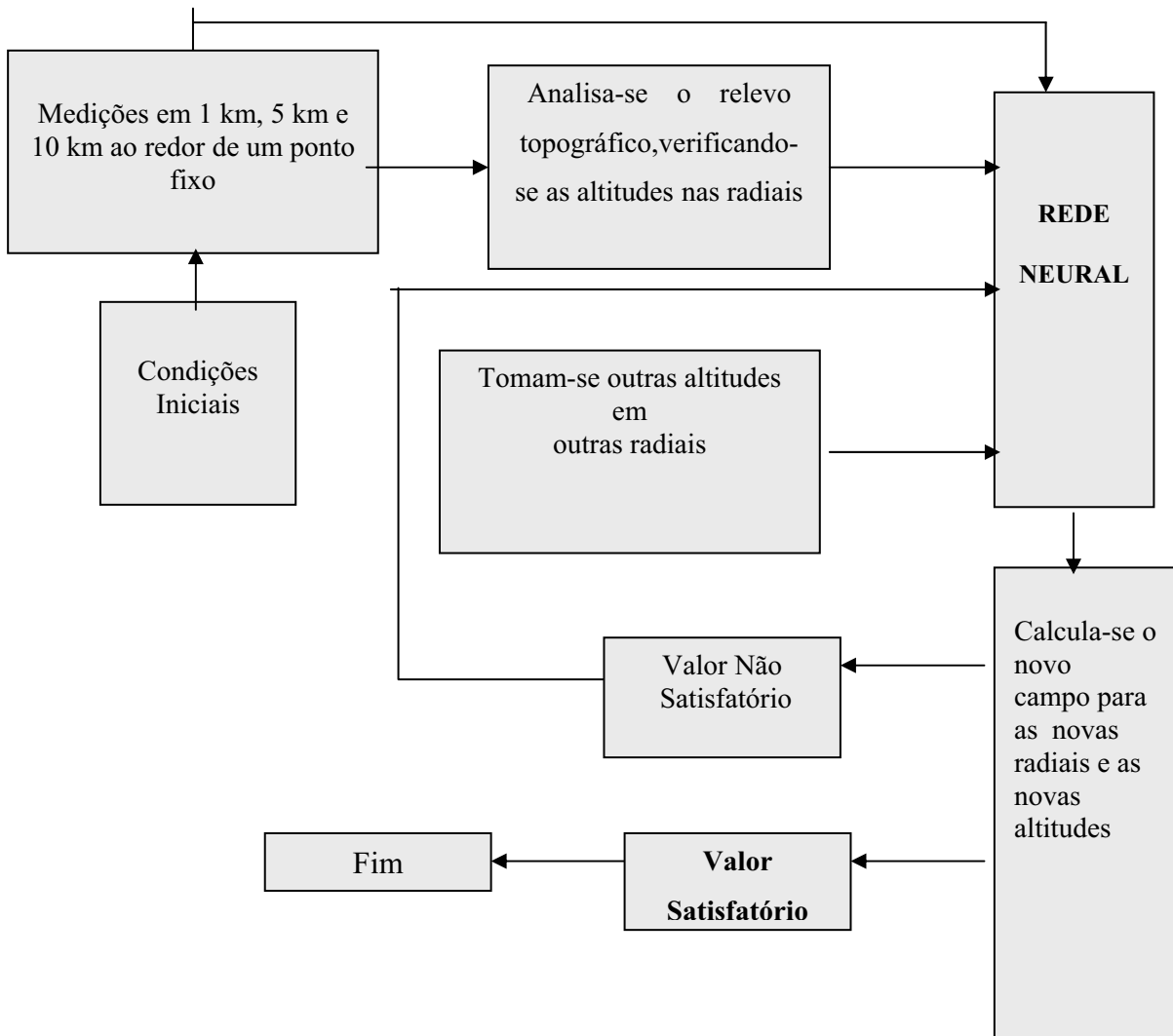


Figura 5.3 – Diagrama de blocos de entrada e saída de dados da RNA.

Tabela 5.1 – Dados do terreno para radiais de 1 Km, com altitudes em metros e campo elétrico em dBmW.

PONTO(Km)	Radial 1	Radial 2	Radial 3	Radial 4	Radial 5	Radial 6	Radial 7	Radial 8
0	92	92	92	92	92	92	92	92
0,1	33	33	33	33	33	33	33	33
0,2	33	33	33	33	33	33	33	33
0,3	33	33	32	29	26	33	14	33
0,4	33	26	31	31	35	33	14	15
0,5	12	28	31	36	32	34	14	15
0,6	11	27	32	35	33	29	10	12
0,7	0	26	32	36	33	30	10	10
0,8	0	26	40	36	33	30	9	4
0,9	0	27	40	36	33	29	8	4
1	0	29	40	37	41	30	5	0
Campo medido em dBmW	-36	-57	-50	-14	-54	-48	-45	-38

Tabela 5.2 – Dados do terreno para radiais de 5 Km, com altitudes em metros e campo elétrico em dBmW.

PONTO(Km)	Radial 1	Radial 2	Radial 3	Radial 4	Radial 5	Radial 6	Radial 7	Radial 8
0	92	92	92	92	92	92	92	92
0,25	33	33	33	33	33	33	33	33
0,5	12	16	33	14	33	33	33	33
0,75	33	12	10	8	32	28	30	32
1	0	5	0	5	26	21	30	42
1,25	0	0	0	0	26	26	43	32
1,5	2	0	2	0	31	36	43	40
1,75	2	0	2	0	35	44	31	40
2	2	0	2	0	41	41	40	40
2,25	2	0	2	2	38	31	42	40
2,5	2	0	2	2	34	41	42	40
2,75	2	0	2	2	32	32	40	40
3	2	0	2	2	21	40	40	40
3,25	2	0	3	2	35	38	41	40
3,5	2	0	2	0	28	36	50	40
3,75	0	0	0	2	33	40	45	40
4	0	13	17	0	33	40	40	42
4,25	0	13	27	0	28	37	40	40
4,5	0	17	34	0	45	37	50	40
4,75	0	20	40	2	39	56	60	40
5	25	16	40	8	36	38	71	42
Campo medido em dBmW	-59	-76	-83	-54	-77	-59	-75	-81

Tabela 5.3 – Dados do terreno para radiais de 10 Km, com altitudes em metros e campo elétrico em dBmW.

PONTO(Km)	Rad 1	Rad 2	Rad 3	Rad 4	Rad 5	Rad 6	Rad 7	Rad 8	Rad 9	Rad 10	Rad 11	Rad 12
0	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92
0,25	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33
0,5	33	15	14	34	32	32	19	28	17	14	32	32
0,75	14	10	10	30	33	33	32	24	8	6	35	33
1	11	0	5	30	41	41	26	5	0	0	41	41
1,25	7	0	0	31	40	40	32	0	0	0	44	40
1,5	4	0	0	31	40	40	32	0	0	0	44	40
1,75	0	2	0	35	40	40	39	0	2	2	41	40
2	2	2	0	37	40	40	41	2	2	2	40	40
2,25	0	2	0	42	40	40	39	2	2	2	40	40
2,5	0	2	0	42	40	40	21	2	2	2	40	40
2,75	0	2	0	41	40	40	30	2	2	2	40	40
3	0	1	0	40	40	40	41	2	2	0	40	40
3,25	0	3	0	40	40	40	36	2	2	0	66	40
3,5	0	2	0	50	40	40	30	2	2	12	80	40
3,75	3	0	0	45	40	40	40	2	2	14	80	40
4	5	19	5	40	40	40	37	2	2	23	80	40
4,25	6	27	14	40	40	43	34	4	15	27	80	40
4,5	9	34	23	62	40	42	34	25	15	38	80	40
4,75	11	40	0	71	57	64	53	27	15	36	89	57
5	13	40	0	71	53	57	39	28	11	40	119	53
5,25	14	40	0	70	45	53	51	30	23	40	80	45
5,5	16	40	0	69	45	50	24	29	31	40	80	45
5,75	18	40	0	68	42	45	31	34	40	40	80	40
6	20	40	2	80	41	40	38	40	43	40	80	41
6,25	22	40	2	77	40	45	43	40	43	40	80	40
6,5	24	40	2	78	40	40	45	40	40	41	73	40
6,75	25	40	2	78	40	40	47	40	40	38	63	40
7	28	40	2	79	40	40	47	40	40	38	50	40
7,25	30	40	2	80	40	40	55	40	40	36	45	40
7,5	32	40	2	76	40	40	62	40	40	41	40	40
7,75	33	40	2	78	41	41	68	40	40	40	40	41
8	35	40	22	37	42	42	79	40	40	40	40	42
8,25	37	79	18	53	43	43	79	44	40	42	40	43
8,5	39	40	19	40	44	44	54	40	40	44	20	44
9	22	40	16	40	41	41	40	40	42	40	10	41
9,25	25	40	12	42	41	41	43	40	40	40	0	41
9,5	26	40	8	41	41	41	39	40	40	40	0	40
9,75	22	39	14	40	41	40	20	40	40	32	0	48
10	2	40	17	40	41	41	0	40	40	37	0	36
Campo dBmW	-74	-77	-67	-72	-74	-66	-99	-98	-89	-93	-74	-101

Tabela 5.4 – Dados do terreno para radiais de 1 Km, com altitudes em metros e campo elétrico em dBmW a ser determinado pela RNA.

PONTO(Km)	Radial 1	Radial 2	Radial 3	Radial 4	Radial 5	Radial 6	Radial 7	Radial 8	Radial 9	Radial 10
0	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92
0,1	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33
0,2	18	33	18	17	16	33	23	25	25	25
0,3	16	16	17	17	18	22	24	25	26	30
0,4	15	16	12	16	17	21	34	35	35	35
0,5	16	14	12	14	16	21	29	31	32	32
0,6	13	12	11	13	15	21	29	33	34	34
0,7	9	9	9	11	16	32	31	33	34	35
0,8	9	4	8	10	15	32	31	33	34	35
0,9	7	4	0	9	14	27	30	41	35	35
1	5	0	0	5	13	28	30	41	41	41
Campo dBmW	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?

Tabela 5.5 – Dados do terreno para radiais de 5 Km, com altitudes em metros e campo elétrico em dBmW a ser determinado pela RNA.

PONTO(Km)	Radial 1	Radial 2	Radial 3	Radial 4	Radial 5	Radial 6	Radial 7	Radial 8	Radial 9	Radial 10
0	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92
0,25	18	17	18	17	16	33	23	25	25	25
0,5	16	14	12	14	16	21	34	31	32	32
0,75	9	9	9	11	16	32	31	33	34	35
1	7	0	0	5	13	28	30	41	41	41
1,25	0	0	0	0	13	27	42	32	38	41
1,5	0	2	0	0	29	43	33	40	44	33
1,75	0	2	2	0	20	44	36	40	45	40
2	0	2	2	0	19	43	40	40	47	40
2,25	0	2	2	31	19	24	40	40	49	40
2,5	0	0	2	0	17	40	41	40	40	40
2,75	0	0	2	2	16	26	41	40	40	40
3	3	0	2	2	14	40	40	40	40	40
3,25	3	3	2	0	14	40	40	40	40	40
3,5	0	12	2	0	36	44	50	40	40	40
3,75	0	18	8	0	16	40	45	40	40	40
4	16	29	10	0	22	40	40	40	40	40
4,25	18	29	10	0	16	40	43	40	40	40
4,5	16	32	0	0	19	40	47	40	40	40
4,75	0	20	40	2	39	56	60	40	40	60
5	24	32	22	0	2	64	54	50	40	80
Campo dBmW	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?

Tabela 5.6 – Dados do terreno para radiais de 10 Km, com altitudes em metros e campo elétrico em dBmW a ser determinado pela RNA.

PONTO(Km)	Rad 1	Rad 2	Rad 3	Rad 4	Rad 5	Rad 6	Rad 7	Rad 8	Rad 9	Rad 10
0	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92
0,25	18	17	18	33	16	33	23	25	25	25
0,5	16	14	12	14	16	21	34	31	32	32
0,75	9	9	9	11	16	32	31	33	34	35
1	7	0	0	5	13	28	30	41	41	41
1,25	0	0	0	0	13	27	42	32	38	41
1,5	4	0	0	0	0	0	32	31	40	40
1,75	0	2	2	0	20	44	36	40	45	40
2	0	2	2	0	19	43	40	40	47	40
2,25	0	2	2	31	19	24	40	40	49	40
2,5	0	0	2	0	17	40	41	40	40	40
2,75	0	0	2	2	16	26	41	40	40	40
3	3	0	2	2	14	40	40	40	40	40
3,25	0	3	2	0	14	40	40	40	40	40
3,5	0	12	21	0	36	44	50	40	40	40
3,75	0	18	8	0	16	40	45	40	40	40
4	16	29	10	0	22	40	40	40	40	40
4,25	18	29	10	0	16	40	43	40	40	40
4,5	16	32	0	0	19	40	47	40	40	40
4,75	17	32	12	0	28	46	47	40	40	53
5	24	32	22	0	2	64	54	50	50	80
5,25	26	40	26	0	0	44	50	41	44	80
5,5	28	40	32	0	0	63	68	42	60	112
5,75	21	40	37	2	4	48	68	47	53	112
6	23	43	40	7	4	49	79	50	72	80
6,25	24	46	40	9	4	40	88	47	80	80
6,5	25	40	40	24	4	59	80	40	80	80
6,75	26	40	40	16	4	40	80	40	74	80
7	28	40	40	14	4	72	87	40	80	76
7,25	29	34	40	2	2	72	80	40	66	80
7,5	31	36	40	6	2	80	70	40	73	80
7,75	31	40	40	6	20	60	68	36	60	70
8	40	38	40	37	2	79	52	40	63	73
8,25	40	42	40	38	2	78	47	40	60	70
8,5	31	40	40	40	2	90	40	42	40	40
9	39	41	40	40	2	38	40	40	43	40
9,25	36	41	40	40	2	43	40	40	43	40
9,5	40	41	40	40	2	41	40	40	45	40
9,75	46	41	40	40	2	40	40	40	45	40
10	39	39	40	40	2	44	40	40	40	48
Campo dBmW	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?

Na Figura 5.4, é feita uma comparação dos dados obtidos na Figura 3.23 (ver Capítulo 3) que são os valores calculados pela RNA e por uma ferramenta de predição de RF [42].

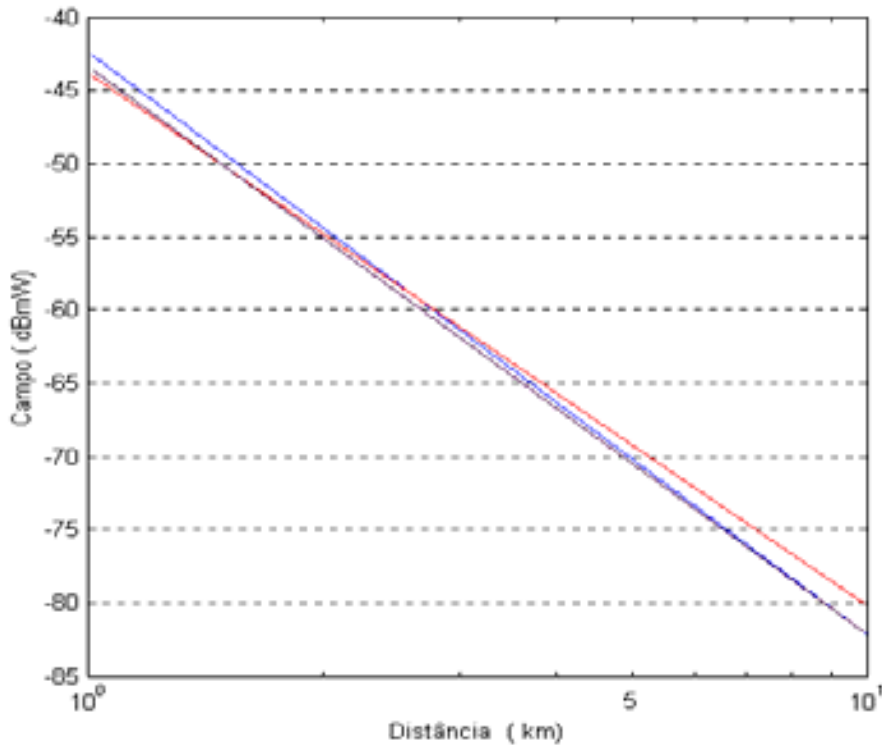


Figura 5.4 – Variação do campo com a distância.

- Valor medido
- Rede neural artificial (RNA)
- Ferramenta de radiofrequência - CEMS & RCES [42]

Na Tabela 5.7, são mostrados os valores de potência obtidos através da RNA, de ferramenta de RF [42] e de valores medidos, observando-se concordância entre os valores numéricos. Na Tabela 5.8 são mostrados os valores do erro médio absoluto, do desvio padrão e do erro RMS.

Tabela 5.7 – Cálculo da potência por métodos distintos

Método	d = 1 Km	d = 5 Km	d = 10 Km
RNA	-43,75 dBmW	-70,5 dBmW	-82 dBmW
Ferramenta de RF [42]	-44 dBmW	-71 dBmW	-80 dBmW
Medido	-43,50 dBmW	-70,5 dBmW	-82 dBmW

Tabela 5.8 – Resultados

Método	Erro Médio Absoluto(dB) (\bar{E})	Desvio Padrão (dB) (σ)	Erro RMS (dB)
RNA	0,08	16,02	16,0201
Ferramenta de RF [42]	1,33	16,13	16,1847

Observa-se através da Tabela 5.8, que o modelo da rede neural apresentou melhor desempenho, onde o erro médio absoluto é de 0,08 dB; desvio padrão de 16,02 dB e o erro RMS de 16,0201 dB. Na ferramenta de RF utilizada o erro médio absoluto é de 1,33 dB; desvio padrão de 16,13 dB e o erro RMS de 16,1847 dB.

5.7 – Conclusão

Neste capítulo foi utilizada uma RNA do tipo *backpropagation* e empregados os dados de medição para a potência, a fim de se obter curvas características de potência versus distância para a região urbana considerada. Nos procedimentos realizados, os valores calculados foram comparados para as técnicas da RNA, valores medidos e os valores da ferramenta de RF. Constatou-se que a técnica da RNA apresentou um melhor desempenho se comparada com uma ferramenta de predição de RF.

CAPÍTULO 6

MODELO DE PREDIÇÃO DE PERDA DE PROPAGAÇÃO EM AMBIENTE URBANO USANDO REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

6.1 – Predição do Campo Elétrico

A predição do campo elétrico em um determinado ponto de uma área de cobertura é de fundamental importância para o planejamento em comunicações móveis, bem como qualquer outro sistema de comunicação sem fio onde seja necessário o conhecimento desse parâmetro [26]. Os parâmetros disponíveis, como potência emitida, ganho da antena, altura da antena, etc., quando aplicados aos modelos adequados fornecerão o valor desejado do campo elétrico no ponto escolhido. Alguns destes modelos, como o de Okumura-Hata, Walfisch-Bertoni, modelo dos trajetos aleatórios, etc. foram descritos no Capítulo 3.

Neste capítulo é realizada uma análise nos dados obtidos através de medições de campo, na qual alguns pontos foram mensurados associados às suas altitudes, as quais deverão também ser associadas às suas correspondentes coordenadas geográficas. As altitudes destas coordenadas podem ser avaliadas através de um altímetro barométrico, calibrado “in loco” de um ponto referenciado ou retiradas do relevo digitalizado (ver Capítulo 4). Depois de obtido o conjunto de pontos medidos, pode-se traçar a curva da *potência medida* em função da distância, mostrada na Figura 6.3 – Rota 1. Dando continuidade à análise para a mesma Rota 1, foi empregada uma Rede Neural Artificial (RNA) [28], [44] que foi treinada com o referido conjunto de pontos medidos, obtendo-se respostas de campos elétricos em termos das altitudes e campos medidos anteriormente, também

mostrado na Figura 6.3 – Rota 1. Para a Rota 2, paralela a Rota 1 (ver Figura 6.4), também foram obtidos pontos e altitudes correspondentes. Um outro procedimento realizado neste trabalho foi a predição do campo elétrico associado à Rota 2, através do treinamento da mesma RNA (Figura 6.4 – Rota 2), baseado

no conjunto de medições obtidas para a Rota 1. Finalmente, foi realizado o cálculo do campo elétrico na Rota 2 com um novo conjunto de pontos medidos, mostrado na Figura 6.4 – Rota 2.

As etapas descritas acima são mostradas no diagrama de blocos da Figura 6.1 e resumidas a seguir:

Etapa (1) - Medições efetuadas na Rota 1 + altitude dos pontos (banco de dados) ⇒ curva: “valor medido” [Figura 6.3 – Rota 1];

Etapa (2) - Altitude de novos pontos da Rota 1 (banco de dados) + Etapa (1) + RNA (*Modelo Neural de Predição*) ⇒ curva: “valor estimado pela rede neural” [Figura 6.3 – Rota 1];

Etapa (3) - Pontos e altitudes de uma Rota 2, semelhante à Rota 1 (banco de dados) + Etapa (1) + RNA (*modelo neural de predição*) ⇒ curva: “valor estimado pela rede neural” [Figura 6.4 – Rota 2];

Etapa (4) - Medições em outros pontos diferentes da Etapa (3) e comparação com a Etapa (3) ⇒ curva “valor medido” [Figura 6.4 – Rota 2].

Convém salientar que os procedimentos descritos acima somente serão válidos para ambientes urbanos com características de canal de propagação similar. Portanto, para ambientes físicos com características variadas, a aplicação de uma RNA na modelagem de predição de perda propagação certamente dará resultados diferentes.

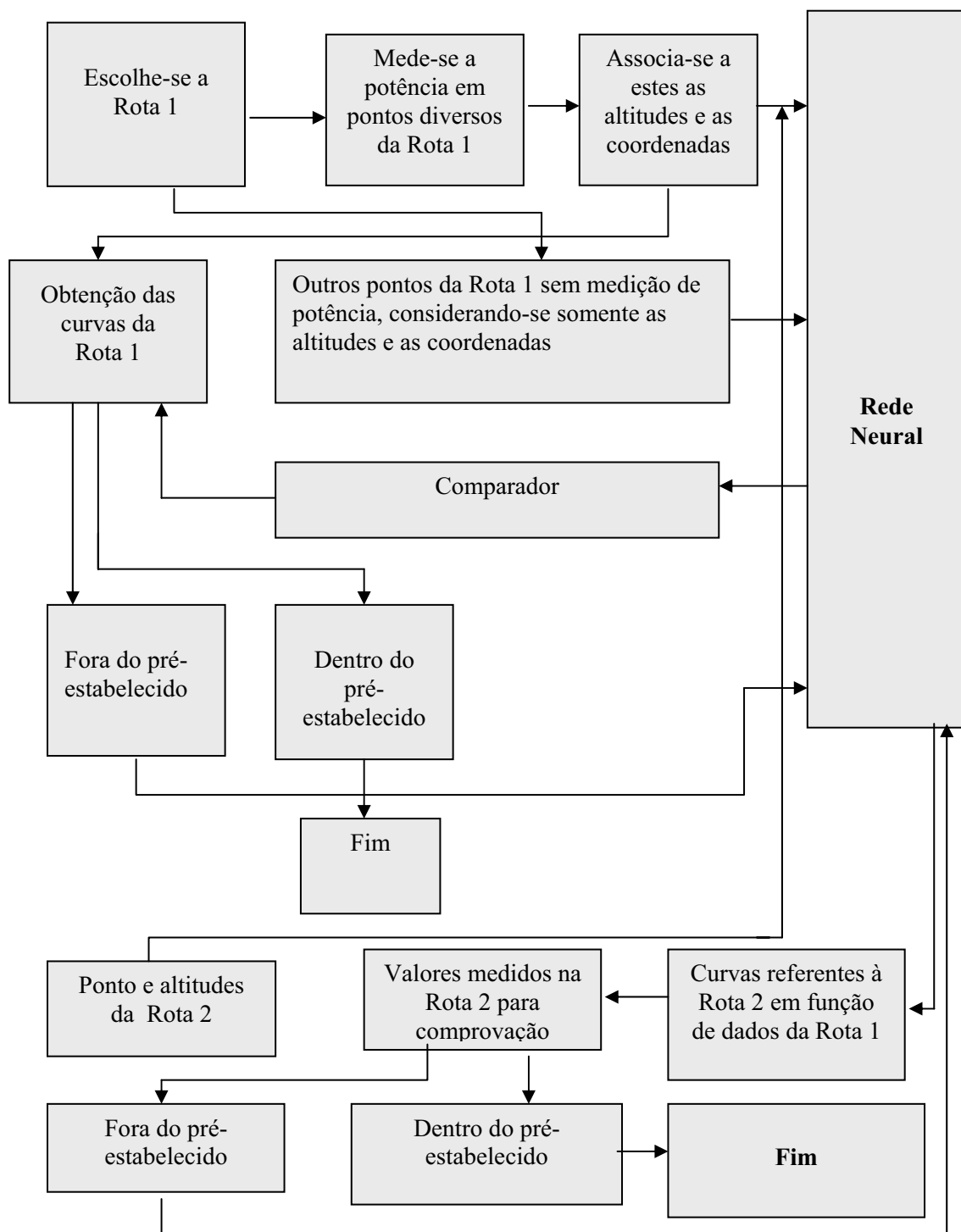


Figura 6.1 – Diagrama de blocos para cálculo de campo para as Rotas 1 e 2.

6.2 – Características de Transmissão e Recepção

Na campanha de medições realizada para este trabalho foi empregado um equipamento emissor, devidamente aferido - ABNT, com as seguintes características técnicas:

- 01 transmissor com potência de 100 W;
- 01 antena *Radio Laboratories* - modelo SRL480*3
ganho: 10 dB_d omnidirecional [Ver Apêndice B];
- Perdas de cabo e inserção de conectores: 5,239 dB.

A frequência de operação usada foi de 931,0125 MHz e o centro de fase da antena estava situado a 7,5 m de altura, numa elevação de 40 metros. As coordenadas geográficas de instalação do equipamento foram: 05°50'33"S e 35°11'53"W.

Para medição e aferição da potência recebida (em dBmW), foi usada uma Unidade Móvel de Radiomonitoragem (UMR) do Sistema de Gestão e Monitoragem do Espectro (SGME) da Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), com sede na cidade de Natal-RN. Este equipamento possui um Sistema de Posicionamento Global (GPS) – Precisão de 5-10 metros - e todas as facilidades de medição de campo e potências bem como da análise do espectro e do comportamento do sinal em vários tipos de modulação.

Em cada ponto geográfico da área de cobertura da antena do site, foram realizadas 100 medições, e em seguida calculada o valor médio do ponto considerado. Este procedimento é feito automaticamente pelo equipamento e tem a duração aproximada de 20 segundos. O horário de realização das medições se deu entre 9:45h e 11:45h do dia 10/01/2003, com temperatura em torno de 30°C e tempo bom.

Nos procedimentos de medições de campo, considerou-se a partir do ponto de emissão duas rotas para a campanha de medição. Convém salientar que medições foram desconsideradas por não atenderem ao valor predefinido de desvio padrão de 8dB para zonas suburbanas típicas. No Apêndice A e na Tabela A.1 desta tese, têm-se os valores de potência para cada ponto na Rota 1; na Tabela A.2 os valores de potência para pontos na Rota 2; e, na Tabela A.3 as medições detalhadas para um ponto particular.

Na Figura 6.2 está ilustrado um mapa de área urbana e suburbana da cidade de Natal. Estão identificados por linha azul a Rota 1 e por linha vermelha a Rota 2 da campanha de medições realizadas.

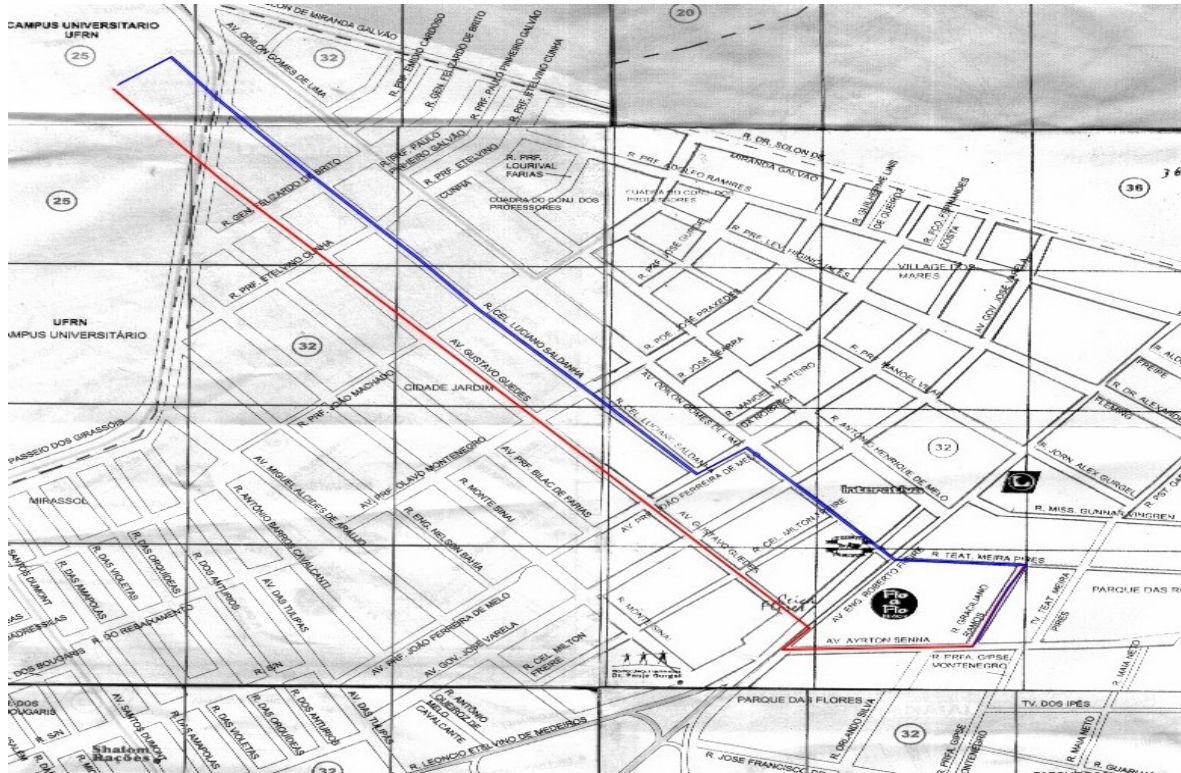


Figura 6.2 – Rota 1 e 2 e campanha de medições para as áreas urbanas e suburbanas da cidade de Natal.

- Rota 1
- Rota 2

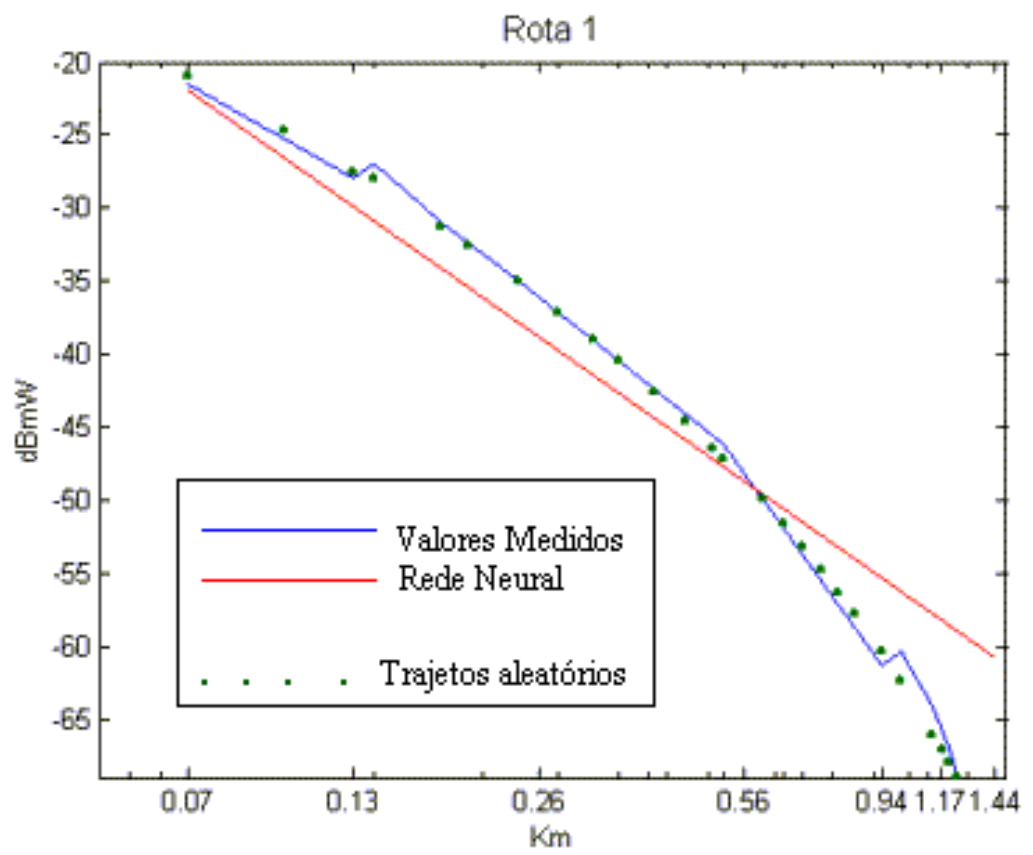


Figura 6.3 - Potência versus distância – Rota 1.

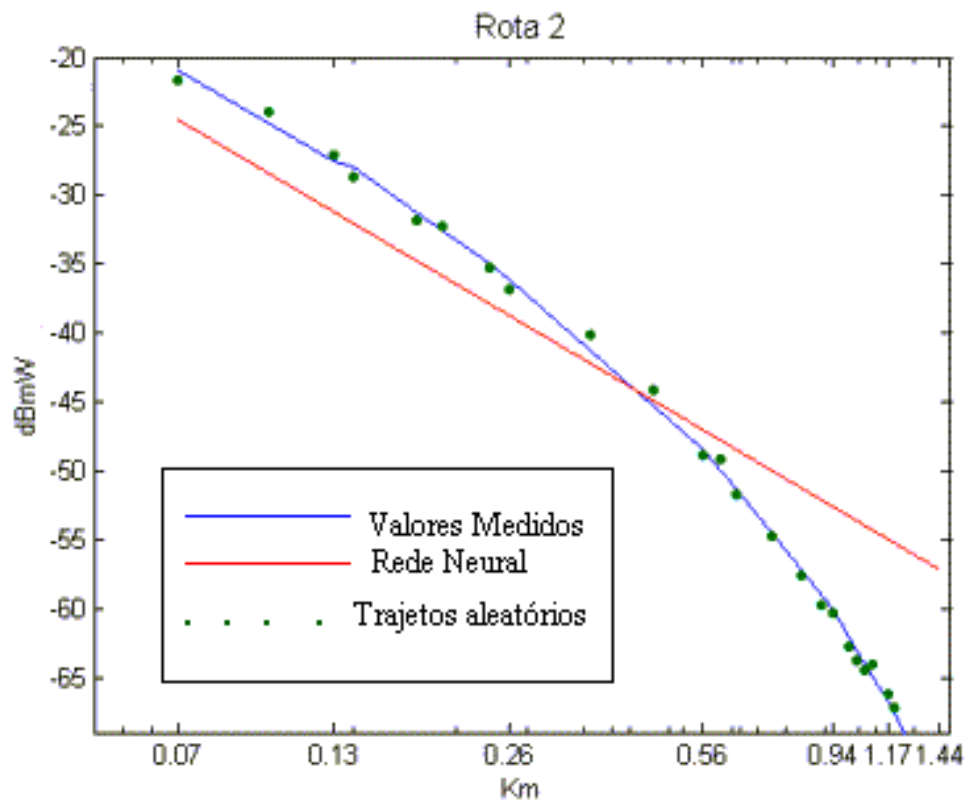


Figura 6.4 - Potência versus distância – Rota 2.

Na aplicação da RNA (fluxograma da Figura 6.1), utilizou-se como dados de entrada os valores obtidos em cada ponto geográfico (com valores medidos para cada ponto geográfico da área de cobertura) e a potência para cada um deles para as Rotas 1 e 2. Como resultado desse procedimento, obteve-se a curva predita pela RNA. Neste trabalho, a RNA utilizada é do tipo *backpropagation*, com uma estrutura básica de três camadas, sendo uma de entrada, uma intermediária (com 20 neurônios) e uma de saída (1-20-1).

Analisando os pontos obtidos para as duas rotas nas Figuras 6.3 e 6.4, sugere-se uma aproximação linear para estes conjuntos de pontos medidos, através de alguma técnica de linearização.

6.3– Conclusão

Neste capítulo é realizada a análise dos conjuntos de pontos medidos em campo para as potências recebidas na área de cobertura da ERB, obtidos através de uma campanha de medição, onde alguns desses pontos foram associados às suas altitudes e às suas correspondentes coordenadas geográficas. Estas coordenadas foram avaliadas através de um altímetro barométrico, calibrado “in loco” de um ponto referenciado ou retiradas do relevo digitalizado.

Foram obtidas curvas de potência versus distância usando-se os dados do conjunto de medições e os métodos da Rede Neural Artificial [28] dos Trajetos Aleatórios [5].

No emprego da RNA foi possível se fazer uma predição de potência recebida em locais não medidos, tendo-se como base as medições efetuadas em ambiente similar e conhecendo-se o relevo altimétrico desses ambientes. Como se pôde verificar, a estimação da RNA tem um valor característico típico para perdas em ambiente móvel suburbano e se pôde prever o valor da potência em qualquer ponto do trajeto de 0,1 Km a 1,3 Km, a partir da ERB e das condições iniciais consideradas. Portanto, as RNAs podem ser usadas de forma precisa e eficiente para o planejamento de sistemas móveis celulares ou para outro sistema de comunicação sem fio.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES

Este trabalho de tese propôs três modelos de predição de perdas de propagação para áreas urbanas da cidade de Natal, no Nordeste Brasileiro, além do desenvolvimento e implementação de programas computacionais específicos para a digitalização do relevo.

Os modelos desenvolvidos e propostos foram os seguintes: (i) um modelo estatístico, que usou estatísticas de 2^a. ordem obtidas de medidas em campo para a potência e altimetria do relevo, que foram acrescentadas ao modelo de perdas lineares; (ii) um modelo de redes neurais, que se fundamentou no treinamento do algoritmo *backpropagation* para obtenção de pontos para a curva de perda de propagação; (iii) um modelo de perda de propagação fundamentado no método do trajeto aleatório, que considerada em sua formulação a aleatoriedade do nível da onda eletromagnética e do ambiente considerado.

Nos procedimentos de medidas de campo, foi usado um medidor de RF dedicado da Agência Nacional de Telecomunicações – ANATEL, seção Natal-RN, obtendo-se valores de níveis de potências em função da distância da estação à unidade móvel, na faixa de freqüências das comunicações móveis.

Na digitalização do relevo das áreas urbanas de Natal, desenvolveu-se programas computacionais específicos que tomaram como base os mapas oficiais existentes no Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, os quais resultaram na obtenção de banco de dados, que foi depois comparado com as medidas de campo, obtendo-se excelentes aproximações numéricas, o que comprovaram sua confiabilidade.

A validação dos modelos propostos de perda de propagação para as áreas urbanas e suburbanas de Natal foi realizada através de comparações com os resultados de medidas de campo, os quais podem ser empregados para quaisquer outras áreas urbanas de cidades com arquiteturas similares à da cidade de Natal.

A continuidade deste trabalho de predição de perdas de propagação ou predição de cobertura é o desenvolvimento de um SURVEY, ou seja, *um sistema para análise de propagação em ambientes de comunicações móveis*. Algumas das características desejadas desta ferramenta de planejamento de comunicações móveis seriam: (i) a locação correta do site; (ii) a otimização de cobertura, a fim de evitar áreas de sombreamento e minimizar interferências eletromagnéticas; (iii) simples, fácil de usar e versátil para aplicações nas soluções propostas.

APÊNDICE A

RESUMO DAS MEDIÇÕES

A- 1 – Resumo das Medições

Neste apêndice, apresentam-se Tabelas que constituem um resumo dos pontos medidos na Rota 1; pontos medidos na Rota 2 e o exemplo de resultado de medição de um único ponto. O resultado desta tabulação está mostrada no Capítulo 6.

TABELA A1 - PONTOS E POTÊNCIAS MEDIDAS - ROTA 1

PONTO	ROTA1	1	2	3	4	5	6	7	8
LATITUDE		055035S	055037S	055033S	055038S	055039S	055045S	055052S	055053S
LONGITUDE		351154W	351154W	351153W	351156W	351148W	351205W	351217W	351219W
DISTANCIA		0,07Km	0,13Km	0,14Km	0,18Km	0,24Km	0,52Km	0,94Km	1,01Km
	MEDIDAS	RMS level	RMS level	RMS level	RMS level	RMS level	RMS level	RMS level	RMS level
	FEITAS	(dBm)	(dBm)	(dBm)	(dBm)	(dBm)	(dBm)	(dBm)	(dBm)
ROTA1	1	-23	-30,5	-24,6	-32,1	-24,6	-45,1	-68	-53,6
	2	-23	-30,7	-24,5	-32,1	-24,5	-45,3	-86	-52,1
	3	-23,1	-31,3	-24,5	-32,2	-24,5	-45,5	-85,9	-51,7
	4	-22,9	-29,7	-24,5	-33,1	-24,5	-45,8	-85,3	-52
	5	-22,9	-28,8	-24,9	-33,2	-24,9	-45,7	-82,6	-53,1
	6	-22,5	-29,4	-24,9	-32,3	-24,9	-45,3	-80,7	-52,9
	7	-22,5	-29,9	-25	-31,9	-25	-44,8	-79,4	-53,7
	8	-22,6	-30,2	-25	-31,7	-25	-44,8	-77,7	-53,6
	9	-22,7	-30,2	-24,7	-31,7	-24,7	-45,1	-76,1	-52,8
	10	-22,8	-30,2	-24,7	-32,3	-24,7	-45,4	-86,8	-52,5
	11	-23,1	-30,1	-24,5	-32,8	-24,5	-45,1	-74,4	-53,5
	12	-22,9	-30	-24,7	-33	-24,7	-45	-72,5	-54,7
	13	-22,7	-30,9	-24,9	-33,1	-24,9	-45,1	-56,2	-55,1
	14	-22,6	-30,8	-24,8	-32,8	-24,8	-45,3	-57,5	-53,4
	15	-22,8	-30,8	-24,7	-32,8	-24,7	-45,5	-58,2	-54,2
	16	-22,9	-30,9	-24,7	-33,2	-24,7	-45,5	-58,2	-54,1
	17	-23	-29,9	-25	-33	-25	-45,2	-57	-54,6
	18	-22,7	-29,3	-25,1	-33,1	-25,1	-45,4	-56,2	-54,6
	19	-22,4	-28,9	-25,2	-33,3	-25,2	-45,1	-54,8	-55,2
	20	-22,4	-29,6	-25,2	-34,2	-25,2	-44,4	-55,3	-55,4
	21	-22,3	-30,3	-24,9	-33,4	-24,9	-44,1	-56,6	-55,5
	22	-22,5	-30,1	-24,5	-32,3	-24,5	-44,1	-58,6	-55,1
	23	-22,7	-30,4	-24,4	-32	-24,4	-44,3	-59,8	-54,8
	24	-22,9	-30	-24,2	-31,6	-24,2	-44	-58,8	-54,2
	25	-22,8	-30,1	-24,2	-31,4	-24,2	-43,7	-56,9	-53,8
	26	-22,8	-30,1	-24,6	-31,9	-24,6	-43,8	-55,8	-53,8
	27	-22,5	-29,7	-25,1	-32,6	-25,1	-44,2	-54,3	-54,2
	28	-22,9	-30,4	-25,4	-32,5	-25,4	-44,6	-55,6	-54
	29	-22,6	-30,3	-25,4	-31,9	-25,4	-44,6	-57,1	-53,6
	30	-22,5	-29,5	-25,2	-32,2	-25,2	-43,9	-59,7	-53,1
	31	-22,6	-28,9	-25,2	-32,4	-25,2	-44	-58,1	-53,3
	32	-22,6	-29	-25,2	-32,4	-25,2	-43,9	-58,6	-53,5
	33	-22,6	-29,5	-25,2	-32,7	-25,2	-44,1	-57,7	-54,1
	34	-22,7	-30,1	-25,3	-32,2	-25,3	-44,4	-57,3	-53,6
	35	-22,6	-30,8	-25	-31,8	-25	-44,3	-57,6	-53,4
	36	-22,8	-31,3	-24,8	-32,2	-24,8	-44,1	-57,8	-54
	37	-22,8	-31,1	-24,7	-31,7	-24,7	-43,8	-59,5	-53,4

38	-22,8	-30,4	-24,3	-31,8	-24,3	-44	-60,7	-54,6
39	-22,9	-30,4	-24,2	-32,2	-24,2	-44,3	-60	-55
40	-22,8	-29,9	-24,4	-32,2	-24,4	-44,9	-56,8	-55,1
41	-22,9	-31	-24,3	-32,1	-24,3	-45,7	-56,7	-55,1
42	-22,5	-31,7	-24,1	-32,1	-24,1	-46,4	-56,4	-54,8
43	-22,6	-30,2	-24	-32,3	-24	-46,3	-56,5	-54,4
44	-22,5	-31,1	-23,8	-32,6	-23,8	-46,1	-57,8	-53,9
45	-22,4	-30,9	-24	-33,3	-24	-45,7	-56,9	-53,7
46	-23,2	-30,4	-24	-32,9	-24	-45,1	-55,5	-54
47	-23,3	-30,5	-24,2	-32,5	-24,2	-45,3	-57,3	-54
48	-23,2	-30,6	-24,4	-33,1	-24,4	-45,2	-58,7	-54,7
49	-22,9	-31,7	-24,2	-33,1	-24,2	-45,3	-58,9	-54,8
50	-22,9	-31,5	-24,2	-33,9	-24,2	-45,1	-57,8	-55
51	-22,7	-31,3	-24,4	-34,2	-24,4	-44,8	-57,5	-55
52	-22,8	-31,6	-24,5	-33	-24,5	-45	-59,4	-54,4
53	-22,7	-31,6	-24,8	-32,6	-24,8	-45,1	-59,4	-54,4
54	-22,8	-30,8	-24,8	-32,9	-24,8	-45,2	-56,6	-54,8
55	-22,8	-30,7	-24,7	-33,1	-24,7	-45,3	-56,6	-54,6
56	-22,9	-30,8	-24,5	-33,6	-24,5	-45	-58	-54,1
57	-23,1	-30,8	-24,3	-33,8	-24,3	-44,9	-57,1	-53,3
58	-23,2	-30,6	-24,4	-34,3	-24,4	-44,9	-57,5	-52,8
59	-23,4	-31,1	-34,9	-34,5	-45,1	-44,9	-59,8	-52,1
60	-23,4	-30,4	-104,2	-33,6	-105,3	-44,9	-59,6	-52,3
61	-23,3	-30	-98,6	-33,3	-99,7	-45	-57,9	-52,6
62	-23,6	-29,8	-91,2	-33,7	-92,3	-45,9	-57,3	-53,2
63	-23,4	-29,4	-86,8	-33,6	-87,8	-46	-57,8	-53,9
64	-23,4	-29,9	-85,8	-33,4	-86,8	-46	-59,8	-53,9
65	-23,4	-30,3	-84,3	-33,4	-85,3	-45,5	-60,5	-53,5
66	-23,4	-30,8	-82,1	-33,2	-83,1	-44,8	-61,2	-53,5
67	-23,4	-30,3	-79,7	-33,6	-80,7	-45	-61,4	-53,1
68	-23,8	-30,4	-78,3	-33,2	-79,2	-45,4	-59,8	-53,5
69	-24,4	-30,9	-77,5	-33,2	-78,5	-46,4	-60,5	-54,4
70	-24,5	-30,4	-106,4	-33,8	-107,4	-46,8	-60,9	-54,1
71	-24,1	-30,3	-62,3	-30,7	-66,1	-46	-61,6	-53,5
72	-24,2	-30,4	-126,8	-35,6	-127,9	-45,8	-62,3	-52,7
73	-25,2	-29,8	-123,7	-35,8	-125	-45,1	-60,7	-52,4
74	-24,7	-29,7	-117,2	-35	-118,7	-45,1	-58,5	-52,7
75	-24,3	-30,6	-112,9	-34,5	-113,9	-45,3	-59,3	-53,2
76	-24,1	-30,1	-111,1	-34,8	-112,1	-45,2	-59	-53,5
77	-24,6	-30,6	-109,3	-35,7	-110,3	-44,7	-60,9	-52,9
78	-25	-30,3	-107,2	-35,7	-108,2	-44,1	-62,7	-52,7
79	-25,6	-29,5	-106,7	-35,7	-107,7	-43,8	-60,2	-52,6
80	-25,4	-29,7	-64	-35	-65,4	-43,8	-60	-52,9
81	-25,7	-29,8	-68	-34,1	-69,5	-43,7	-58,5	-53,5
82	-25,3	-30,1	-71,9	-34,3	-71,9	-44,1	-57,8	-53,7

	83	-26	-30,2	-72,1	-33,5	-72,1	-44,1	-57,6	-53,3
	84	-25,2	-30,3	-72,3	-33,6	-72,3	-44,2	-59,6	-53,7
	85	-24,5	-30,7	-72,2	-33,5	-72,2	-44,3	-60,3	-53,3
	86	-24,1	-30,3	-72,1	-33,8	-72	-44,6	-61,5	-53,3
	87	-24,4	-29,4	-72	-35,2	-72	-44,8	-63,5	-53,2
	88	-25	-29,9	-24,2	-34,1	-24,2	-44,5	-59,7	-52,7
	89	-24,8	-29,5	-24,6	-33	-24,6	-44,2	-59,1	-52,6
	90	-24,6	-29	-24,9	-32,9	-24,9	-44,4	-59,2	-52,5
	91	-24,6	-29,6	-24,9	-33,1	-24,9	-45,4	-61,9	-52,5
	92	-24,7	-28,9	-24,8	-32,6	-24,8	-45,9	-62	-52,9
	93	-24,6	-28,6	-24,7	-35,1	-24,6	-45,6	-59,8	-53,3
	94	-24,3	-28,4	-24,7	-39,3	-24,6	-45,2	-58,6	-53,7
	95	-24,5	-29,2	-24,4	-38,1	-24,4	-44,8	-58,6	-53,5
	96	-23,9	-30	-24	-36,3	-24	-44,3	-59,7	-53
	97	-23,9	-29,7	-24	-35,4	-24	-43,9	-60,5	-53,1
	98	-24,1	-30,3	-23,3	-33,3	-23,3	-43,6	-61,6	-52,9
	99	-23,9	-30,2	-23,2	-33,6	-23,2	-43,1	-62,6	-53,6
	100	-24,1	-30,2	-23	-33,8	-23	-43,6	-62,3	-53,4
MÉDIA		-23,434	-30,212	-42,962	-33,323	-43,329	-44,877	-61,268	-53,656

TABELA 1 – PONTOS E POTÊNCIAS MEDIDAS – ROTA 1 - CONTINUAÇÃO

PONTO	ROTA1	9	10	11	12	13	14	15	16
LATITUDE		055057S	055057S	055104S	055109S	055113S	055057S	055057S	055104S
LONGITUDE		351221W	351224W	351222W	351221W	351214W	351221W	351224W	351222W
DISTANCIA		1,14Km	1,21Km	1,31Km	1,41Km	1,44Km	1,14Km	1,21Km	1,31Km
	MEDIDAS	RMS level	RMS level	RMS level	RMS level	RMS level	RMS level	RMS level	RMS level
	FEITAS	(dBm)	(dBm)	(dBm)	(dBm)	(dBm)	(dBm)	(dBm)	(dBm)
ROTA1	1	-53,2	-66,6	-56	-54	-63,5	-53,2	-66,6	-56
	2	-53	-67,9	-56,1	-54,1	-67,4	-53	-67,9	-56,1
	3	-52,8	-67,9	-55,4	-54,2	-66,8	-52,8	-67,9	-55,4
	4	-53,8	-68,9	-56	-53,8	-62,1	-53,8	-68,9	-56
	5	-54,7	-66,9	-56,6	-53,2	-65	-54,7	-66,9	-56,6
	6	-54,9	-66,3	-55,8	-54,1	-67,1	-54,9	-66,3	-55,8
	7	-55,3	-66,3	-56,1	-54,3	-64,2	-55,3	-66,3	-56,1
	8	-55,9	-66,7	-57,2	-54,2	-63,1	-55,9	-66,7	-57,2
	9	-55,4	-67,6	-57,6	-54,8	-63,2	-55,4	-67,6	-57,6
	10	-54,9	-69,1	-55,9	-55,5	-64,6	-54,9	-69,1	-55,9
	11	-54,3	-69,4	-56,6	-55,8	-67,1	-54,3	-69,4	-56,6
	12	-54,2	-68,3	-56,8	-56,6	-64	-54,2	-68,3	-56,8
	13	-54,2	-67	-56,5	-56	-61,8	-54,2	-67	-56,5
	14	-54,2	-67,6	-55,6	-55,8	-62,6	-54,2	-67,6	-55,6
	15	-53,9	-68,4	-55,1	-55,5	-62,7	-53,9	-68,4	-55,1
	16	-53,8	-68,9	-55,6	-54,5	-63,7	-53,8	-68,9	-55,6
	17	-53,7	-68,2	-57	-54,5	-64,1	-53,7	-68,2	-57
	18	-54,1	-67,1	-55,4	-54,3	-64,7	-54,1	-67,1	-55,4
	19	-54	-66,9	-55,3	-54,1	-66,7	-54	-66,9	-55,3
	20	-54,8	-68,6	-55,2	-53,7	-60,8	-54,8	-68,6	-55,2
	21	-55,5	-69,4	-54,8	-53,8	-60,1	-55,5	-69,4	-54,8
	22	-55,3	-69,6	-55,9	-52,8	-61,9	-55,3	-69,6	-55,9
	23	-54,1	-68	-55,6	-53,1	-65,5	-54,1	-68	-55,6
	24	-54,2	-66,6	-56,3	-54	-61,7	-54,2	-66,6	-56,3
	25	-54,5	-66,7	-55,2	-54,3	-61,2	-54,5	-66,7	-55,2
	26	-54,5	-67,5	-55,5	-54,8	-61,5	-54,5	-67,5	-55,5
	27	-55	-67,8	-54,8	-54,7	-62	-55	-67,8	-54,8
	28	-55,4	-68	-55,4	-55	-61,4	-55,4	-68	-55,4
	29	-54,6	-68	-56,6	-55,8	-60,8	-54,6	-68	-56,6
	30	-54,5	-67,6	-56,3	-56	-59,5	-54,5	-67,6	-56,3
	31	-54,5	-66,5	-55,1	-56	-60	-54,5	-66,5	-55,1
	32	-54,5	-66,3	-55,2	-55,1	-59,4	-54,5	-66,3	-55,2
	33	-54,1	-66,7	-56,3	-55	-59,4	-54,1	-66,7	-56,3
	34	-53,7	-66,6	-56	-55,2	-59,6	-53,7	-66,6	-56
	35	-53,1	-66,8	-55,9	-55,2	-59,6	-53,1	-66,8	-55,9
	36	-52,7	-68,5	-55,1	-55	-58,7	-52,7	-68,5	-55,1
	37	-53,5	-69,4	-57,8	-54,8	-58,3	-53,5	-69,4	-57,8

38	-54,3	-68	-57,1	-55,3	-58	-54,3	-68	-57,1
39	-53,8	-68,7	-58,2	-56,1	-58,1	-53,8	-68,7	-58,2
40	-53,8	-68,8	-56,1	-55,9	-58,2	-53,8	-68,8	-56,1
41	-53,7	-68,6	-56	-56,3	-58,7	-53,7	-68,6	-56
42	-53,8	-67,3	-56,2	-56,1	-58,1	-53,8	-67,3	-56,2
43	-54,3	-66,8	-55	-56,2	-58,2	-54,3	-66,8	-55
44	-54,4	-67,6	-56,7	-56,2	-57,6	-54,4	-67,6	-56,7
45	-54,8	-67,2	-57,7	-57,1	-58,3	-54,8	-67,2	-57,7
46	-55,4	-66,7	-56,4	-57,9	-59,4	-55,4	-66,7	-56,4
47	-55,7	-67	-56,4	-56,3	-60,5	-55,7	-67	-56,4
48	-55,6	-67	-58,3	-55,3	-61,5	-55,6	-67	-58,3
49	-55,9	-67	-59,1	-57	-61,9	-55,9	-67	-59,1
50	-55,8	-67,5	-58,9	-56,1	-60,8	-55,8	-67,5	-58,9
51	-55,7	-68,1	-61,2	-55,2	-59,7	-55,7	-68,1	-61,2
52	-55,4	-68,2	-61,1	-55,4	-59,3	-55,4	-68,2	-61,1
53	-55,4	-67,6	-61,7	-55,3	-59,2	-55,4	-67,6	-61,7
54	-55,5	-68,5	-64,5	-55,6	-59,6	-55,5	-68,5	-64,5
55	-55,3	-68,4	-61,1	-55,7	-60,1	-55,3	-68,4	-61,1
56	-54,9	-68,4	-64,6	-56,2	-59,2	-54,9	-68,4	-64,6
57	-55,2	-68,6	-61,6	-56,4	-58,9	-55,2	-68,6	-61,6
58	-55	-68,5	-57,1	-56	-60,1	-55	-68,5	-57,1
59	-54,8	-69,8	-63,1	-55,1	-61,1	-54,8	-69,8	-63,1
60	-54,8	-67,8	-64,4	-54,8	-61	-54,8	-67,8	-64,4
61	-55,2	-68	-65,8	-54,7	-60,9	-55,2	-68	-65,8
62	-55,6	-69,1	-65,4	-55,4	-60,7	-55,6	-69,1	-65,4
63	-56,1	-69	-68,3	-54,9	-60,8	-56,1	-69	-68,3
64	-56	-68	-64,5	-54,5	-62,3	-56	-68	-64,5
65	-55,7	-68,3	-65	-54,8	-61,2	-55,7	-68,3	-65
66	-55,3	-68,8	-65,3	-55,3	-61,2	-55,3	-68,8	-65,3
67	-55,2	-68,5	-63,2	-55,3	-63,8	-55,2	-68,5	-63,2
68	-56	-67,3	-63,7	-55	-62	-56	-67,3	-63,7
69	-57,1	-67,6	-64,7	-55,1	-64,2	-57,1	-67,6	-64,7
70	-56,9	-67,7	-64,3	-54,8	-63,1	-56,9	-67,7	-64,3
71	-57,7	-67,5	-66,3	-54,3	-61,3	-57,7	-67,5	-66,3
72	-57,8	-67	-63,4	-54,8	-62	-57,8	-67	-63,4
73	-56,8	-68,8	-66	-55,1	-61,1	-56,8	-68,8	-66
74	-55,5	-68,2	-68,8	-55,3	-60,9	-55,5	-68,2	-68,8
75	-55,4	-67,2	-64,4	-55,2	-60,9	-55,4	-67,2	-64,4
76	-55,6	-67,6	-63,1	-55,2	-61,8	-55,6	-67,6	-63,1
77	-55,1	-66,3	-63,1	-55,1	-62,5	-55,1	-66,3	-63,1
78	-54,5	-67	-68,8	-54,8	-61,8	-54,5	-67	-68,8
79	-55,5	-67,1	-64	-54,3	-58,3	-55,5	-67,1	-64
80	-55,1	-68,3	-62,6	-54,3	-58	-55,1	-68,3	-62,6
81	-54,8	-69,7	-65,5	-54,2	-55,4	-54,8	-69,7	-65,5
82	-54,6	-68,1	-65,9	-54,3	-55,5	-54,6	-68,1	-65,9
83	-55,5	-67,9	-60,3	-54,4	-56,9	-55,5	-67,9	-60,3
84	-55,7	-67,8	-58,5	-54,8	-58,8	-55,7	-67,8	-58,5
85	-56,1	-67,2	-59,9	-55,6	-60,1	-56,1	-67,2	-59,9
86	-56,7	-67,8	-60,8	-56,2	-57,5	-56,7	-67,8	-60,8
87	-57,4	-66,8	-61,4	-56,2	-56,6	-57,4	-66,8	-61,4

	88	-56,7	-67,9	-60	-56,3	-57	-56,7	-67,9	-60
	89	-55,7	-67,8	-59,2	-56,5	-58,3	-55,7	-67,8	-59,2
	90	-56	-67,7	-61,5	-57,4	-58,1	-56	-67,7	-61,5
	91	-56,1	-68	-63,9	-56,9	-58,3	-56,1	-68	-63,9
	92	-55,2	-67	-61,8	-56,3	-59,4	-55,2	-67	-61,8
	93	-54,9	-67,3	-63,1	-55,7	-59,3	-54,9	-67,3	-63,1
	94	-55,3	-67,3	-69,2	-55,3	-60,2	-55,3	-67,3	-69,2
	95	-55,2	-68,7	-64,7	-54,9	-59,2	-55,2	-68,7	-64,7
	96	-55,6	-67,7	-62,6	-53,9	-59	-55,6	-67,7	-62,6
	97	-55,9	-67,9	-60,9	-54,1	-58,8	-55,9	-67,9	-60,9
	98	-54,8	-69,1	-65,6	-53,3	-66,1	-54,8	-69,1	-65,6
	99	-55	-68,3	-68,8	-53,2	-65,1	-55	-68,3	-68,8
	100	-55,9	-66,8	-73,3	-53,3	-61,3	-55,9	-66,8	-73,3
MÉDIA		-55,033	-67,808	-59,997	-55,121	-60,93	-55,033	-67,808	-59,997

TABELA A2 - PONTOS E POTÊNCIAS MEDIDAS - ROTA 2

PONTO	ROTA2	1	4	5	7	8	9	10	11
LATITUDE		055040S	055050S	055052S	055056S	055059S	055101S	055104S	055108S
LONGITUDE		351148W	351159W	351201W	351207W	351209W	351211W	351215W	351214W
DISTANCIA		0,26Km	0,56Km	0,64Km	0,83Km	0,94Km	1,03Km	1,17Km	1,26Km
	MEDIDAS	RMS level	RMS level	RMS level	RMS level	RMS level	RMS level	RMS level	RMS level
	FEITAS	(dBm)	(dBm)	(dBm)	(dBm)	(dBm)	(dBm)	(dBm)	(dBm)
ROTA2									
	1	-41,1	-46,7	-46,4	-46,7	-46,3	-46,7	-52,2	-54,9
	2	-42,5	-46	-46,2	-46	-46,2	-46	-53,6	-55,5
	3	-40,9	-45,8	-45,8	-45,8	-46,6	-45,8	-53,6	-58,4
	4	-42,1	-46,6	-46,4	-46,6	-46,6	-46,6	-52,7	-56,1
	5	-41,2	-46	-46,2	-46	-47,1	-46	-52	-55,6
	6	-39,7	-46,6	-45,4	-46,6	-46,4	-46,6	-52,6	-55,3
	7	-41,3	-46,7	-45,5	-46,7	-45,4	-46,7	-52	-56,4
	8	-45,1	-46,7	-45,8	-46,7	-45,8	-46,7	-51,9	-57
	9	-44,3	-47	-46,1	-47	-47	-47	-52,3	-57
	10	-49,2	-46,7	-46,8	-46,7	-46,9	-46,7	-52,7	-57,3
	11	-48,2	-47,2	-47,3	-47,2	-46,8	-47,2	-52,2	-57,3
	12	-47,5	-48,2	-46,8	-48,2	-46,8	-48,2	-52,3	-58,3
	13	-45,6	-48,5	-46	-48,5	-46,8	-48,5	-52,6	-59,7
	14	-47,4	-46,7	-45,8	-46,7	-46,4	-46,7	-52,4	-61,2
	15	-49,4	-45,4	-45,2	-45,4	-46,3	-45,4	-51,8	-60
	16	-50	-44,9	-44,8	-44,9	-46,2	-44,9	-51,7	-58,1
	17	-52,5	-45,1	-45,4	-45,1	-45,9	-45,1	-52,3	-54,7
	18	-51,4	-46,8	-45,8	-46,8	-45,9	-46,8	-52	-55,4
	19	-45,3	-49	-46	-49	-46,2	-49	-51,7	-55,6
	20	-40,3	-49,6	-45,7	-49,6	-47,1	-49,6	-50,7	-57,2
	21	-38,8	-46,8	-45,9	-46,8	-47,2	-46,8	-50,9	-58,1
	22	-38,4	-44,7	-46	-44,7	-47	-44,7	-51	-57,9
	23	-40,5	-45	-45,9	-45	-47,3	-45	-51,5	-56,5
	24	-43	-45,2	-46	-45,2	-47,5	-45,2	-51,5	-55,7
	25	-41,8	-45,8	-45,7	-45,8	-47,5	-45,8	-51,8	-57,5
	26	-38,6	-45,7	-45,7	-45,7	-47,1	-45,7	-52,3	-59,4
	27	-37,6	-45,1	-46,2	-45,1	-46,6	-45,1	-52,5	-60,3
	28	-38,1	-45,1	-46,6	-45,1	-46,2	-45,1	-52,3	-60,8
	29	-39,6	-45,3	-46,4	-45,3	-46,3	-45,3	-52	-59,5
	30	-37,4	-45,3	-46	-45,3	-46,7	-45,3	-52,3	-60,4
	31	-37,6	-45	-45,2	-45	-46,2	-45	-52,7	-60,1
	32	-37,5	-44,9	-44,8	-44,9	-45,6	-44,9	-53,2	-56,3
	33	-44,3	-44,8	-44,9	-44,8	-45,2	-44,8	-53,2	-57,7
	34	-42,6	-45,2	-45,6	-45,2	-44,9	-45,2	-53,2	-57,8
	35	-45,6	-45,8	-46,6	-45,8	-45	-45,8	-53,7	-56,5

36	-45,3	-45,8	-46,9	-45,8	-45,4	-45,8	-53,6	-56,2
37	-45,5	-45,4	-47,1	-45,4	-45,4	-45,4	-54,4	-57
38	-46,3	-45,2	-47,3	-45,2	-45,7	-45,2	-55	-57,2
39	-38,4	-44,9	-47,1	-44,9	-45,7	-44,9	-56,6	-54,8
40	-37,6	-44,9	-46,9	-44,9	-45,6	-44,9	-56,3	-55,3
41	-35,4	-45,4	-46,1	-45,4	-45,5	-45,4	-55,7	-54,5
42	-33,7	-46,1	-46	-46,1	-45,2	-46,1	-55,7	-54,3
43	-35	-46,3	-46,6	-46,3	-45,2	-46,3	-55	-54
44	-34,7	-46,9	-46,4	-46,9	-45,3	-46,9	-55,3	-55,3
45	-35,5	-46,6	-46,1	-46,6	-45,7	-46,6	-54,7	-55,2
46	-36,6	-45,7	-45,4	-45,7	-45,7	-45,7	-54,6	-56,3
47	-38,6	-45,7	-44,8	-45,7	-45,3	-45,7	-54,4	-56,9
48	-37,3	-45,6	-44,8	-45,6	-45,3	-45,6	-53,8	-56,6
49	-36,2	-44,9	-44,6	-44,9	-45,7	-44,9	-53,2	-55,9
50	-37	-44,6	-44,8	-44,6	-45,9	-44,6	-53	-55
51	-37,3	-44,8	-44,6	-44,8	-46,2	-44,8	-53,1	-55
52	-35,5	-45,3	-45,9	-45,3	-46,1	-45,3	-53,1	-55,6
53	-36,1	-45,4	-48,7	-45,4	-45,3	-45,4	-52,5	-54,3
54	-35,8	-45,4	-47,6	-45,4	-45,2	-45,4	-52,9	-54,9
55	-36,8	-45,4	-44,1	-45,4	-45,5	-45,4	-52,9	-57,1
56	-38,3	-45,9	-44,3	-45,9	-45,5	-45,9	-53,3	-56,7
57	-38,4	-46,3	-43,7	-46,3	-45,4	-46,3	-54,1	-55,4
58	-37,2	-46,1	-43,7	-46,1	-45,4	-46,1	-54,7	-55,6
59	-36,9	-46	-46,3	-46	-45,5	-46	-51,5	-56
60	-35,5	-46	-46	-46	-45,6	-46	-51	-55,9
61	-35,7	-46,2	-45,8	-46,2	-46	-46,2	-51,4	-55,7
62	-34,1	-46,4	-46,1	-46,4	-45,7	-46,4	-52	-55,2
63	-35,8	-46,5	-46,2	-46,5	-45,7	-46,5	-52,6	-56,3
64	-36,4	-46,7	-46,2	-46,7	-45,8	-46,7	-53,6	-57,7
65	-36,3	-46,5	-47	-46,5	-46,1	-46,5	-53,9	-57
66	-36,6	-46,1	-46,2	-46,1	-46,1	-46,1	-54,2	-56,8
67	-38,3	-46,6	-46,5	-46,6	-46,4	-46,6	-53,3	-58
68	-36,4	-46,3	-46,2	-46,3	-46,9	-46,3	-53,9	-58,2
69	-37,4	-46,3	-45,8	-46,3	-46,7	-46,3	-56,8	-56,3
70	-37	-46,3	-45,8	-46,3	-47,1	-46,3	-56,1	-56,3
71	-38,3	-46,2	-46,3	-46,2	-46,7	-46,2	-54,3	-57,7
72	-37,2	-46,5	-46	-46,5	-46,7	-46,5	-53,4	-57,8
73	-37,1	-46,8	-45,9	-46,8	-46,7	-46,8	-54,4	-56,2
74	-37,6	-46,2	-46	-46,2	-47,3	-46,2	-54,5	-57,3
75	-37,5	-46,5	-46,9	-46,5	-47,8	-46,5	-54,1	-58,3
76	-38,3	-46,6	-47,3	-46,6	-47,3	-46,6	-54,2	-59
77	-39,6	-46,5	-46,9	-46,5	-47,5	-46,5	-53,8	-57,7
78	-36,7	-46,8	-46,7	-46,8	-46,8	-46,8	-54,1	-56,6
79	-37,6	-46,8	-46,4	-46,8	-46,7	-46,8	-53,2	-56,6

	80	-38,6	-47	-46,5	-47	-47,2	-47	-53,1	-57,8
	81	-43	-46,7	-45,9	-46,7	-47,1	-46,7	-53,1	-58
	82	-39,9	-47,2	-45,5	-47,2	-46,8	-47,2	-52,8	-57,2
	83	-44,9	-46,7	-45,7	-46,7	-46,8	-46,7	-53,2	-56,7
	84	-46	-46	-45,9	-46	-46,9	-46	-53,2	-56,5
	85	-46	-45,9	-46,7	-45,9	-46,8	-45,9	-54,2	-56,6
	86	-50,1	-45,5	-46,5	-45,5	-46,8	-45,5	-55,8	-57,8
	87	-45,5	-46,2	-45,8	-46,2	-46,7	-46,2	-56,5	-59,8
	88	-39,2	-47,9	-45,5	-47,9	-46,3	-47,9	-56,6	-61,2
	89	-39	-48,8	-45,7	-48,8	-46,6	-48,8	-57,2	-60,4
	90	-41	-48,4	-45,7	-48,4	-47,4	-48,4	-56,2	-59,6
	91	-38,1	-47	-45,5	-47	-47	-47	-55,1	-60,2
	92	-39	-45,2	-45,1	-45,2	-47,2	-45,2	-54,6	-59,1
	93	-38,6	-45,1	-45,2	-45,1	-47	-45,1	-53,3	-58,4
	94	-38,9	-48,3	-45,6	-48,3	-46,5	-48,3	-52,6	-60,3
	95	-37,9	-47	-45,5	-47	-45,6	-47	-53,6	-60,3
	96	-39,6	-46,6	-45,6	-46,6	-45,6	-46,6	-53,3	-58
	97	-38,2	-47	-45,5	-47	-45,7	-47	-53,1	-58,5
	98	-37,6	-45,7	-45,5	-45,7	-45,7	-45,7	-53,3	-57,6
	99	-38,7	-45,7	-45,6	-45,7	-45,6	-45,7	-52,6	-60,5
MÉDIA	100	-37,9	-46,5	-46,3	-46,5	-45,7	-46,5	-52,7	-62
		-40,089	-46,197	-45,937	-46,14	-46,263	-46,197	-53,397	-57,277

TABELA A2 - PONTOS E POTÊNCIAS MEDIDAS - ROTA 2 - CONTINUAÇÃO

PONTO	ROTA2	12	13
LATITUDE		055113S	055113S
LONGITUDE		351214W	351214W
DISTANCIA		1,39Km	1,44Km
	MEDIDAS	RMS level	RMS level
	FEITAS	(dBm)	(dBm)
ROTA2	1	-55,2	-63,5
	2	-56	-67,4
	3	-55,9	-66,8
	4	-54,9	-62,1
	5	-55,5	-65
	6	-56,2	-67,1
	7	-57,2	-64,2
	8	-56,9	-63,1
	9	-56,6	-63,2
	10	-55	-64,6
	11	-55,5	-67,1
	12	-56,6	-64
	13	-57,4	-61,8
	14	-56,2	-62,6
	15	-55,4	-62,7
	16	-54,5	-63,7
	17	-53,6	-64,1
	18	-53,1	-64,7
	19	-53	-66,7
	20	-53,4	-60,8
	21	-53,7	-60,1
	22	-54	-61,9
	23	-54,4	-65,5
	24	-54,4	-61,7
	25	-54,5	-61,2
	26	-55,3	-61,5
	27	-55,7	-62
	28	-56	-61,4
	29	-56,5	-60,8
	30	-56,8	-59,5
	31	-55,7	-60
	32	-55,6	-59,4
	33	-57,2	-59,4
	34	-58	-59,6
	35	-56,8	-59,6
	36	-57,7	-58,7
	37	-56,2	-58,3

38	-53,5	-58
39	-58,7	-58,1
40	-57,5	-58,2
41	-57,1	-58,7
42	-57,5	-58,1
43	-58,2	-58,2
44	-58,4	-57,6
45	-57,8	-58,3
46	-59	-59,4
47	-59,6	-60,5
48	-61,1	-61,5
49	-57,8	-61,9
50	-55,6	-60,8
51	-56,6	-59,7
52	-57,3	-59,3
53	-58,4	-59,2
54	-58,2	-59,6
55	-57,4	-60,1
56	-57,8	-59,2
57	-57,2	-58,9
58	-56,8	-60,1
59	-57,3	-61,1
60	-56,3	-61
61	-55,5	-60,9
62	-55,6	-60,7
63	-56	-60,8
64	-56,8	-62,3
65	-56,9	-61,2
66	-57,5	-61,2
67	-58,6	-63,8
68	-58,7	-62
69	-56,7	-64,2
70	-56,1	-63,1
71	-57,6	-61,3
72	-56,6	-62
73	-56,1	-61,1
74	-56,3	-60,9
75	-55,5	-60,9
76	-56,6	-61,8
77	-57,1	-62,5
78	-58,1	-61,8
79	-57,5	-58,3
80	-57,4	-58

81	-56,6	-55,4
82	-57,2	-55,5
83	-59	-56,9
84	-58,3	-58,8
85	-57,8	-60,1
86	-58,3	-57,5
87	-57,8	-56,6
88	-57,8	-57
89	-58,6	-58,3
90	-58,6	-58,1
91	-56,5	-58,3
92	-56,2	-59,4
93	-56,8	-59,3
94	-56,3	-60,2
95	-58,9	-59,2
96	-58,8	-59
97	-56,3	-58,8
98	-57,4	-66,1
99	-57,4	-65,1
100	-56,1	-61,3
	-56,696	-60,93

MÉDIA

TABELA A3 - MEDIÇÃO DE POTÊNCIA NOS PONTOS

PONTO	MEDIDAS	1A{02}	2A{03}	3A{01}	4A{05}	5A{04}	6A{31}	10A{30}	7A{06}
LATITUDE	FEITAS	055035S	055037S	055033S	055038S	055039S	055040S	055043S	055040S
LONGITUDE		351154W	351154W	351153W	351156W	351148W	351148W	351151W	351201W
DISTANCIA		0,07Km	0,13Km	0,14Km	0,18Km	0,24Km	0,26Km	0,31Km	0,33Km
		RMS level	RMS level	RMS level	RMS level	RMS level	RMS level	RMS level	RMS level
		(dBm)	(dBm)	(dBm)	(dBm)	(dBm)	(dBm)	(dBm)	(dBm)
1		-23	-30,5	-24,6	-32,1	-24,6	-41,1	-27,7	-17,9
2		-23	-30,7	-24,5	-32,1	-24,5	-42,5	-27,5	-17,9
3		-23,1	-31,3	-24,5	-32,2	-24,5	-40,9	-27,6	-17,9
4		-22,9	-29,7	-24,5	-33,1	-24,5	-42,1	-27,9	-17,9
5		-22,9	-28,8	-24,9	-33,2	-24,9	-41,2	-27,9	-17,9
6		-22,5	-29,4	-24,9	-32,3	-24,9	-39,7	-28	-17,8
7		-22,5	-29,9	-25	-31,9	-25	-41,3	-27,7	-17,8
8		-22,6	-30,2	-25	-31,7	-25	-45,1	-28,2	-17,8
9		-22,7	-30,2	-24,7	-31,7	-24,7	-44,3	-28,6	-17,8
10		-22,8	-30,2	-24,7	-32,3	-24,7	-49,2	-29,2	-17,8
11		-23,1	-30,1	-24,5	-32,8	-24,5	-48,2	-29	-18
12		-22,9	-30	-24,7	-33	-24,7	-47,5	-28,3	-17,9
13		-22,7	-30,9	-24,9	-33,1	-24,9	-45,6	-28,1	-17,9
14		-22,6	-30,8	-24,8	-32,8	-24,8	-47,4	-27,9	-18
15		-22,8	-30,8	-24,7	-32,8	-24,7	-49,4	-27,8	-18
16		-22,9	-30,9	-24,7	-33,2	-24,7	-50	-28,1	-18
17		-23	-29,9	-25	-33	-25	-52,5	-28,4	-18,1
18		-22,7	-29,3	-25,1	-33,1	-25,1	-51,4	-28,6	-18,3
19		-22,4	-28,9	-25,2	-33,3	-25,2	-45,3	-28,8	-18,3
20		-22,4	-29,6	-25,2	-34,2	-25,2	-40,3	-28,5	-18,3
21		-22,3	-30,3	-24,9	-33,4	-24,9	-38,8	-27,9	-18,3
22		-22,5	-30,1	-24,5	-32,3	-24,5	-38,4	-27,6	-18,3
23		-22,7	-30,4	-24,4	-32	-24,4	-40,5	-27,8	-18,2
24		-22,9	-30	-24,2	-31,6	-24,2	-43	-27,8	-18,3
25		-22,8	-30,1	-24,2	-31,4	-24,2	-41,8	-27,9	-18,1
26		-22,8	-30,1	-24,6	-31,9	-24,6	-38,6	-28	-18,1
27		-22,5	-29,7	-25,1	-32,6	-25,1	-37,6	-28,2	-18,2
28		-22,9	-30,4	-25,4	-32,5	-25,4	-38,1	-28,2	-18,2
29		-22,6	-30,3	-25,4	-31,9	-25,4	-39,6	-27,7	-18,1
30		-22,5	-29,5	-25,2	-32,2	-25,2	-37,4	-27,5	-18,1
31		-22,6	-28,9	-25,2	-32,4	-25,2	-37,6	-27,4	-18,2
32		-22,6	-29	-25,2	-32,4	-25,2	-37,5	-27,8	-18,2
33		-22,6	-29,5	-25,2	-32,7	-25,2	-44,3	-28	-18,2
34		-22,7	-30,1	-25,3	-32,2	-25,3	-42,6	-28,2	-18,4
35		-22,6	-30,8	-25	-31,8	-25	-45,6	-28,2	-18,5
36		-22,8	-31,3	-24,8	-32,2	-24,8	-45,3	-27,9	-18,5

37	-22,8	-31,1	-24,7	-31,7	-24,7	-45,5	-27,9	-18,4
38	-22,8	-30,4	-24,3	-31,8	-24,3	-46,3	-27,8	-18,1
39	-22,9	-30,4	-24,2	-32,2	-24,2	-38,4	-27,3	-18
40	-22,8	-29,9	-24,4	-32,2	-24,4	-37,6	-27,2	-17,9
41	-22,9	-31	-24,3	-32,1	-24,3	-35,4	-27,3	-17,9
42	-22,5	-31,7	-24,1	-32,1	-24,1	-33,7	-27,2	-17,9
43	-22,6	-30,2	-24	-32,3	-24	-35	-27,4	-18
44	-22,5	-31,1	-23,8	-32,6	-23,8	-34,7	-27,3	-17,9
45	-22,4	-30,9	-24	-33,3	-24	-35,5	-27,6	-17,8
46	-23,2	-30,4	-24	-32,9	-24	-36,6	-28,3	-17,6
47	-23,3	-30,5	-24,2	-32,5	-24,2	-38,6	-28,8	-17,7
48	-23,2	-30,6	-24,4	-33,1	-24,4	-37,3	-28,2	-17,7
49	-22,9	-31,7	-24,2	-33,1	-24,2	-36,2	-27,9	-17,7
50	-22,9	-31,5	-24,2	-33,9	-24,2	-37	-28	-17,8
51	-22,7	-31,3	-24,4	-34,2	-24,4	-37,3	-27,9	-17,8
52	-22,8	-31,6	-24,5	-33	-24,5	-35,5	-27,6	-17,8
53	-22,7	-31,6	-24,8	-32,6	-24,8	-36,1	-27,6	-17,7
54	-22,8	-30,8	-24,8	-32,9	-24,8	-35,8	-27,4	-17,5
55	-22,8	-30,7	-24,7	-33,1	-24,7	-36,8	-27,2	-17,6
56	-22,9	-30,8	-24,5	-33,6	-24,5	-38,3	-27,3	-17,6
57	-23,1	-30,8	-24,3	-33,8	-24,3	-38,4	-27,7	-17,6
58	-23,2	-30,6	-24,4	-34,3	-24,4	-37,2	-27,8	-17,6
59	-23,4	-31,1	-34,9	-34,5	-45,1	-36,9	-27	-17,5
60	-23,4	-30,4	-104,2	-33,6	-105,3	-35,5	-27,3	-17,7
61	-23,3	-30	-98,6	-33,3	-99,7	-35,7	-27,2	-17,7
62	-23,6	-29,8	-91,2	-33,7	-92,3	-34,1	-27,4	-17,7
63	-23,4	-29,4	-86,8	-33,6	-87,8	-35,8	-27,4	-17,7
64	-23,4	-29,9	-85,8	-33,4	-86,8	-36,4	-27,5	-17,7
65	-23,4	-30,3	-84,3	-33,4	-85,3	-36,3	-27,6	-17,6
66	-23,4	-30,8	-82,1	-33,2	-83,1	-36,6	-27,4	-17,5
67	-23,4	-30,3	-79,7	-33,6	-80,7	-38,3	-27,5	-17,4
68	-23,8	-30,4	-78,3	-33,2	-79,2	-36,4	-27,5	-17,5
69	-24,4	-30,9	-77,5	-33,2	-78,5	-37,4	-27,6	-17,4
70	-24,5	-30,4	-106,4	-33,8	-107,4	-37	-27,7	-17,5
71	-24,1	-30,3	-62,3	-30,7	-66,1	-38,3	-27,8	-17,5
72	-24,2	-30,4	-126,8	-35,6	-127,9	-37,2	-27,6	-17,5
73	-25,2	-29,8	-123,7	-35,8	-125	-37,1	-27,5	-17,6
74	-24,7	-29,7	-117,2	-35	-118,7	-37,6	-27,5	-17,6
75	-24,3	-30,6	-112,9	-34,5	-113,9	-37,5	-27,7	-17,8
76	-24,1	-30,1	-111,1	-34,8	-112,1	-38,3	-27,6	-17,7
77	-24,6	-30,6	-109,3	-35,7	-110,3	-39,6	-27,4	-17,6
78	-25	-30,3	-107,2	-35,7	-108,2	-36,7	-27,2	-17,6
79	-25,6	-29,5	-106,7	-35,7	-107,7	-37,6	-27,1	-17,6

80	-25,4	-29,7	-64	-35	-65,4	-38,6	-27,2	-17,7
81	-25,7	-29,8	-68	-34,1	-69,5	-43	-27,3	-17,7
82	-25,3	-30,1	-71,9	-34,3	-71,9	-39,9	-27,5	-17,7
83	-26	-30,2	-72,1	-33,5	-72,1	-44,9	-27,5	-17,8
84	-25,2	-30,3	-72,3	-33,6	-72,3	-46	-27,5	-17,8
85	-24,5	-30,7	-72,2	-33,5	-72,2	-46	-27,6	-17,9
86	-24,1	-30,3	-72,1	-33,8	-72	-50,1	-27,8	-18
87	-24,4	-29,4	-72	-35,2	-72	-45,5	-28,2	-17,9
88	-25	-29,9	-24,2	-34,1	-24,2	-39,2	-28,5	-18
89	-24,8	-29,5	-24,6	-33	-24,6	-39	-28	-18
90	-24,6	-29	-24,9	-32,9	-24,9	-41	-28,4	-18
91	-24,6	-29,6	-24,9	-33,1	-24,9	-38,1	-28,3	-18,1
92	-24,7	-28,9	-24,8	-32,6	-24,8	-39	-28,3	-18
93	-24,6	-28,6	-24,7	-35,1	-24,6	-38,6	-28,2	-18,1
94	-24,3	-28,4	-24,7	-39,3	-24,6	-38,9	-27,7	-18
95	-24,5	-29,2	-24,4	-38,1	-24,4	-37,9	-27,7	-18,1
96	-23,9	-30	-24	-36,3	-24	-39,6	-27,6	-18,2
97	-23,9	-29,7	-24	-35,4	-24	-38,2	-27,8	-18,1
98	-24,1	-30,3	-23,3	-33,3	-23,3	-37,6	-27,9	-18,2
99	-23,9	-30,2	-23,2	-33,6	-23,2	-38,7	-28	-18,3
100	-24,1	-30,2	-23	-33,8	-23	-37,9	-28,3	-18,3
	-23,434	-30,212	-42,962	-33,323	-43,329	-40,089	-27,804	-17,901

MEIDA

TABELA A3 – MEDIÇÃO DE POTÊNCIAS NOS PONTOS - CONTINUAÇÃO

PONTO	8A{29}	9A{28}	11A{07}	12A{08}	13A{22}	14A{26}	15A{09}	16A{25}
LATITUDE	055045S	055047S	055043S	055045S	055050S	055052S	055048S	055054S
LONGITUDE	351154W	351156W	351203W	351205W	351159W	351201W	351209W	351204W
DISTANCIA	0,37Km	0,44Km	0,44Km	0,52Km	0,56Km	0,64Km	0,68Km	0,73Km
MEDIDAS FEITAS	RMS level (dBm)	RMS level (dBm)	RMS level (dBm)	RMS level (dBm)	RMS level (dBm)	RMS level (dBm)	RMS level (dBm)	RMS level (dBm)
1	-59,5	-41,9	-107,1	-45,1	-46,7	-46,4	-32,3	-46
2	-59,9	-41,8	-105,6	-45,3	-46	-46,2	-32,2	-44,7
3	-63,9	-42	-104	-45,5	-45,8	-45,8	-32,1	-43,6
4	-69,6	-41,9	-107,9	-45,8	-46,6	-46,4	-32	-44,4
5	-70,2	-42,5	-106,4	-45,7	-46	-46,2	-32,1	-45,1
6	-62,2	-42,2	-105	-45,3	-46,6	-45,4	-32,2	-43,8
7	-56,5	-41,8	-103,3	-44,8	-46,7	-45,5	-32,5	-43,5
8	-58,3	-41,9	-101,8	-44,8	-46,7	-45,8	-32,5	-44,5
9	-60	-42,2	-100,2	-45,1	-47	-46,1	-32,4	-44,6
10	-63,1	-42,8	-108,8	-45,4	-46,7	-46,8	-32,3	-44,2
11	-64,2	-42,7	-107,2	-45,1	-47,2	-47,3	-31,9	-43,4
12	-61,6	-42,2	-105,3	-45	-48,2	-46,8	-32	-43,6
13	-60,8	-42	-103,6	-45,1	-48,5	-46	-32,3	-43,6
14	-58,5	-41,9	-108	-45,3	-46,7	-45,8	-32,4	-43,2
15	-58,3	-41,4	-106,4	-45,5	-45,4	-45,2	-32,3	-43,6
16	-59,1	-41,9	-72	-45,5	-44,9	-44,8	-32	-42,8
17	-61,2	-42	-66,4	-45,2	-45,1	-45,4	-32,3	-44
18	-62,5	-41,6	-73,8	-45,4	-46,8	-45,8	-32,4	-44,9
19	-61,2	-41,3	-80,7	-45,1	-49	-46	-32,1	-44,4
20	-54,5	-41,6	-19,2	-44,4	-49,6	-45,7	-32,1	-43,6
21	-55,5	-42,1	-18,6	-44,1	-46,8	-45,9	-32,2	-43,8
22	-55,9	-42,5	-18,6	-44,1	-44,7	-46	-32,2	-43,5
23	-55,6	-42,4	-19,9	-44,3	-45	-45,9	-32,3	-44,4
24	-53,7	-42,8	-19,8	-44	-45,2	-46	-32,7	-44,9
25	-54	-43,6	-20,1	-43,7	-45,8	-45,7	-32,6	-44
26	-54	-43,4	-19,4	-43,8	-45,7	-45,7	-32,5	-44,2
27	-56,7	-42,6	-19,4	-44,2	-45,1	-46,2	-32,4	-45,2
28	-54,3	-42	-19,8	-44,6	-45,1	-46,6	-32,3	-46,1
29	-54,4	-41,8	-19,9	-44,6	-45,3	-46,4	-32,4	-43,2
30	-58,1	-41,2	-20,2	-43,9	-45,3	-46	-32,6	-48,6
31	-55,5	-41,3	-20,3	-44	-45	-45,2	-32,5	-48,4
32	-57,8	-41,8	-20,2	-43,9	-44,9	-44,8	-32,5	-48,1
33	-61,6	-42,5	-20,3	-44,1	-44,8	-44,9	-32,3	-49,5

34	-59,2	-42,2	-20	-44,4	-45,2	-45,6	-32,5	-42,5
35	-56,6	-42,4	-20,1	-44,3	-45,8	-46,6	-32,8	-41,5
36	-55,7	-42,7	-20,2	-44,1	-45,8	-46,9	-32,8	-42,3
37	-55,8	-42,5	-20,4	-43,8	-45,4	-47,1	-32,8	-42,7
38	-55,2	-41,5	-20,3	-44	-45,2	-47,3	-32,8	-41,2
39	-52,9	-41,6	-20,2	-44,3	-44,9	-47,1	-32,8	-43,5
40	-54,6	-41,8	-20,2	-44,9	-44,9	-46,9	-32,8	-42,9
41	-53,4	-41,9	-19,9	-45,7	-45,4	-46,1	-32,9	-43
42	-55	-41,5	-20	-46,4	-46,1	-46	-32,8	-43,8
43	-58,3	-41,9	-20	-46,3	-46,3	-46,6	-32,7	-43,8
44	-58,7	-42,8	-19,9	-46,1	-46,9	-46,4	-32,9	-43,1
45	-62,4	-42,7	-20	-45,7	-46,6	-46,1	-33	-42,9
46	-60,4	-43,6	-20,1	-45,1	-45,7	-45,4	-32,7	-44
47	-103,8	-44,2	-20,3	-45,3	-45,7	-44,8	-32,7	-46
48	-102	-43,8	-20,2	-45,2	-45,6	-44,8	-32,6	-46,2
49	-110,7	-44	-20,3	-45,3	-44,9	-44,6	-32,7	-47,8
50	-111,5	-43,4	-20,3	-45,1	-44,6	-44,8	-32,9	-47,1
51	-109,6	-42,9	-20,2	-44,8	-44,8	-44,6	-33,1	-46,1
52	-108	-43,6	-20,4	-45	-45,3	-45,9	-33,3	-44,6
53	-106,2	-43,9	-20,5	-45,1	-45,4	-48,7	-33,2	-44,5
54	-64,4	-44,2	-20,6	-45,2	-45,4	-47,6	-33	-44,5
55	-63,3	-43,9	-20,5	-45,3	-45,4	-44,1	-32,9	-44,6
56	-68,8	-44,2	-20,2	-45	-45,9	-44,3	-32,9	-45,6
57	-63,6	-44,3	-20,4	-44,9	-46,3	-43,7	-32,8	-46,5
58	-65,4	-44,8	-20,5	-44,9	-46,1	-43,7	-32,7	-47,8
59	-51,8	-45,1	-20,6	-44,9	-46	-46,3	-32,7	-49,5
60	-49,9	-45,3	-20,5	-44,9	-46	-46	-32,9	-49,8
61	-52,8	-44,5	-20,4	-45	-46,2	-45,8	-33	-49
62	-54,3	-43	-20,3	-45,9	-46,4	-46,1	-32,9	-48,9
63	-53,2	-42,8	-20,3	-46	-46,5	-46,2	-33	-44,4
64	-53,5	-42,7	-20,3	-46	-46,7	-46,2	-32,9	-44,6
65	-51,8	-43	-20,4	-45,5	-46,5	-47	-33,1	-45
66	-50,6	-43	-20,4	-44,8	-46,1	-46,2	-33	-44,9
67	-50,6	-42,6	-20,4	-45	-46,6	-46,5	-32,8	-44,9
68	-52,1	-42,7	-20,3	-45,4	-46,3	-46,2	-32,7	-45,6
69	-55,3	-44,2	-20,2	-46,4	-46,3	-45,8	-32,7	-46,4
70	-55	-44,8	-20	-46,8	-46,3	-45,8	-32,8	-46,3
71	-57,6	-44,3	-20,1	-46	-46,2	-46,3	-33,2	-45,9
72	-59,2	-44,5	-20,4	-45,8	-46,5	-46	-33,2	-45,3
73	-56,2	-43,7	-20,5	-45,1	-46,8	-45,9	-33	-45,8
74	-55,3	-43,4	-20,3	-45,1	-46,2	-46	-33,1	-46,2

75	-55	-43,5	-20,2	-45,3	-46,5	-46,9	-33,1	-45,8
76	-54,5	-43	-20,4	-45,2	-46,6	-47,3	-33,1	-45
77	-3,9	-43,1	-20,4	-44,7	-46,5	-46,9	-33	-45,1
78	-53,9	-43,5	-20,4	-44,1	-46,8	-46,7	-32,9	-44,6
79	-58,7	-43,7	-20,4	-43,8	-46,8	-46,4	-32,9	-44,7
80	-60,3	-44,2	-20,2	-43,8	-47	-46,5	-32,8	-46,8
81	-58	-44,1	-20,2	-43,7	-46,7	-45,9	-32,9	-48,8
82	-58	-43,5	-20,3	-44,1	-47,2	-45,5	-33	-47,7
83	-55,9	-42,7	-20,4	-44,1	-46,7	-45,7	-33	-44,9
84	-57,6	-42,7	-20,5	-44,2	-46	-45,9	-33,1	-44,9
85	-58,9	-43,4	-20,6	-44,3	-45,9	-46,7	-33	-44,3
86	-58,4	-42,9	-20,6	-44,6	-45,5	-46,5	-32,9	-43,2
87	-56,8	-43	-20,6	-44,8	-46,2	-45,8	-32,8	-42,8
88	-53,9	-43,6	-20,5	-44,5	-47,9	-45,5	-32,8	-43,7
89	-54,1	-44,2	-20,4	-44,2	-48,8	-45,7	-32,7	-43,9
90	-53,7	-43,7	-20,4	-44,4	-48,4	-45,7	-32,6	-44,5
91	-54,1	-43,3	-20,4	-45,4	-47	-45,5	-32,6	-44,4
92	-54,1	-43,6	-20,3	-45,9	-45,2	-45,1	-32,8	-44,5
93	-53,5	-43,7	-20,3	-45,6	-45,1	-45,2	-32,8	-43,8
94	-53,4	-43,6	-20,5	-45,2	-48,3	-45,6	-33	-43,6
95	-53,1	-43,5	-20,4	-44,8	-47	-45,5	-32,7	-43,5
96	-55,4	-42,4	-20,7	-44,3	-46,6	-45,6	-32,6	-43,5
97	-55,8	-42,8	-20,8	-43,9	-47	-45,5	-32,6	-43,9
98	-58,9	-42	-21	-43,6	-45,7	-45,5	-32,5	-44,1
99	-66,5	-41,5	-21	-43,1	-45,7	-45,6	-32,6	-43,7
100	-73,6	-41,9	-21,1	-43,6	-46,5	-46,3	-32,7	-44
MÉDIA	-61,069	-42,886	-44,877	-44,877	-46,197	-45,937	-32,675	-44,861

APÊNDICE B

CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA IRRADIANTE

Antena Omnidirecional Polarização Vertical

800

V

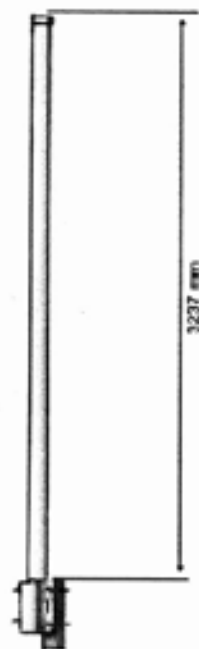
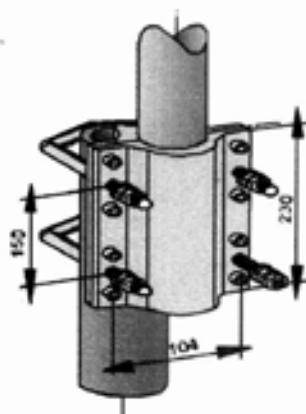
Omnidirecional 360° Polarização vertical 800 10 dBd

Descrições	738 192
Faixa de frequência	800-808 MHz
Polarização	Vertical
Ganho	10 dBd
Impedância	50 Ohms
VSWR	< 1,5
Intermodulação IM3 (2 x 43 dBm portadora)	< - 150 dBc
Potência máxima por entrada	500 Watt (temperatura ambiente de 50° C)

Material: **Material irradiante:** Cobre e metal
Radome: Fibras de vidro, diâmetro: 21 mm
Cor: Cinza
Base: Alumínio
Todos os parafusos e arruelas são de aço inoxidável.

Montagem: A antena pode ser fixada lateralmente em qualquer mastro tubular de 50 - 94 mm de diâmetro (a conexão do cabo deve ser feita na parte externa do tubo)

Aterramento: Todas as partes da antena incluindo os condutores internos possuem aterramento DC.



738 192



Diagrama Vertical

Especificações mecânicas	738 192
Conector	DIN 7 / 16 Fêmea
Posição do conector	inferior
Peso	8,5 Kg
Diâmetro do radome	51 mm
Carga de vento	230 N (a 150 Km/h)
Altura	3237 mm
Dimensões da embalagem	3516 x 148 x 112

Figura B.1 - Características da Antena

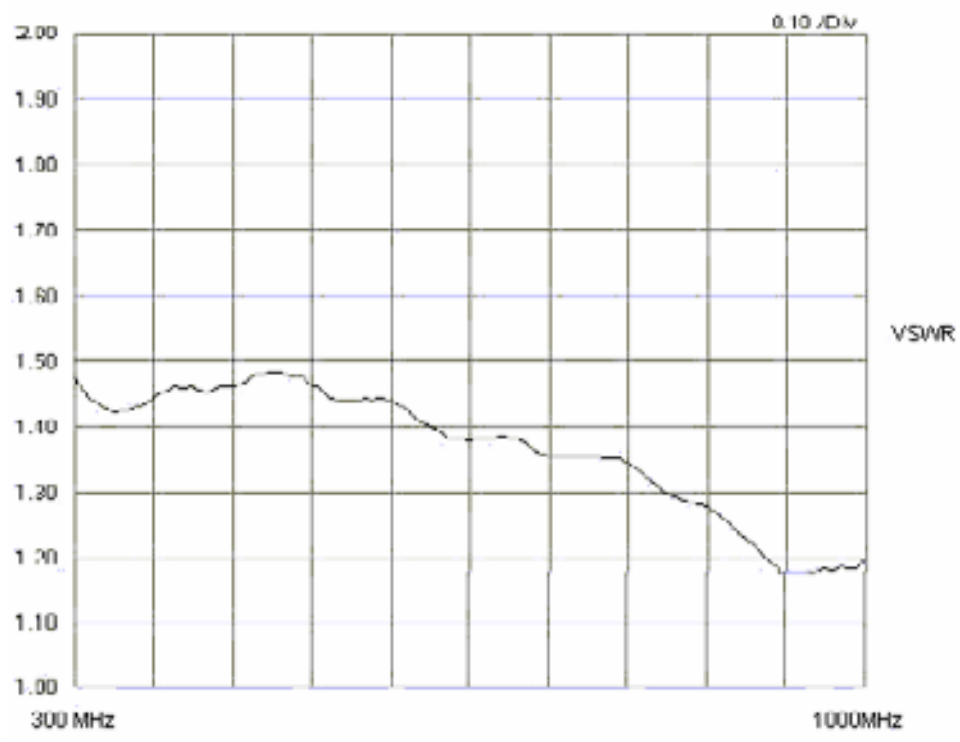


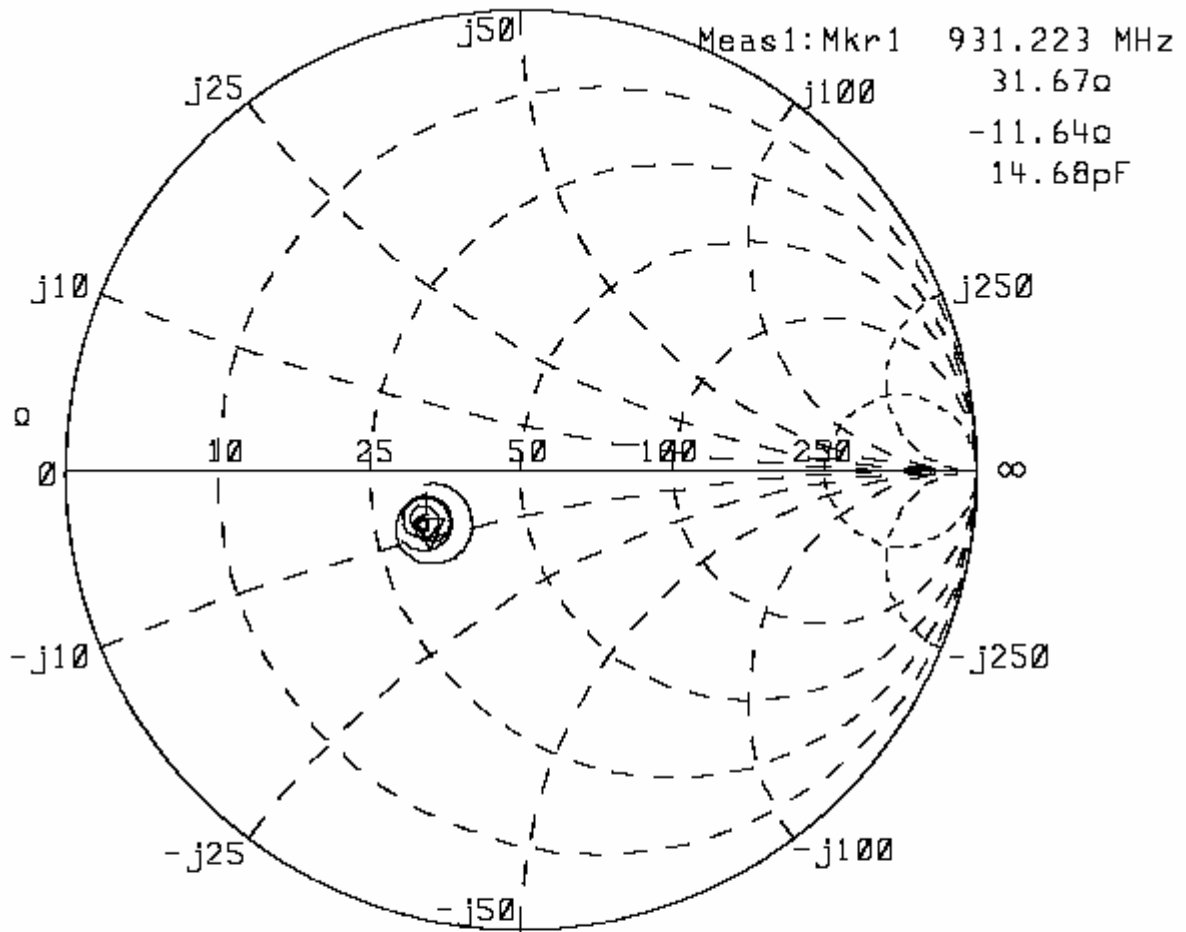
Figura B.3 - VSWR na frequência de serviço (dados do fabricante)

►1:Ref1 Port1
▷2:Off

Smith

1 U FS

C?

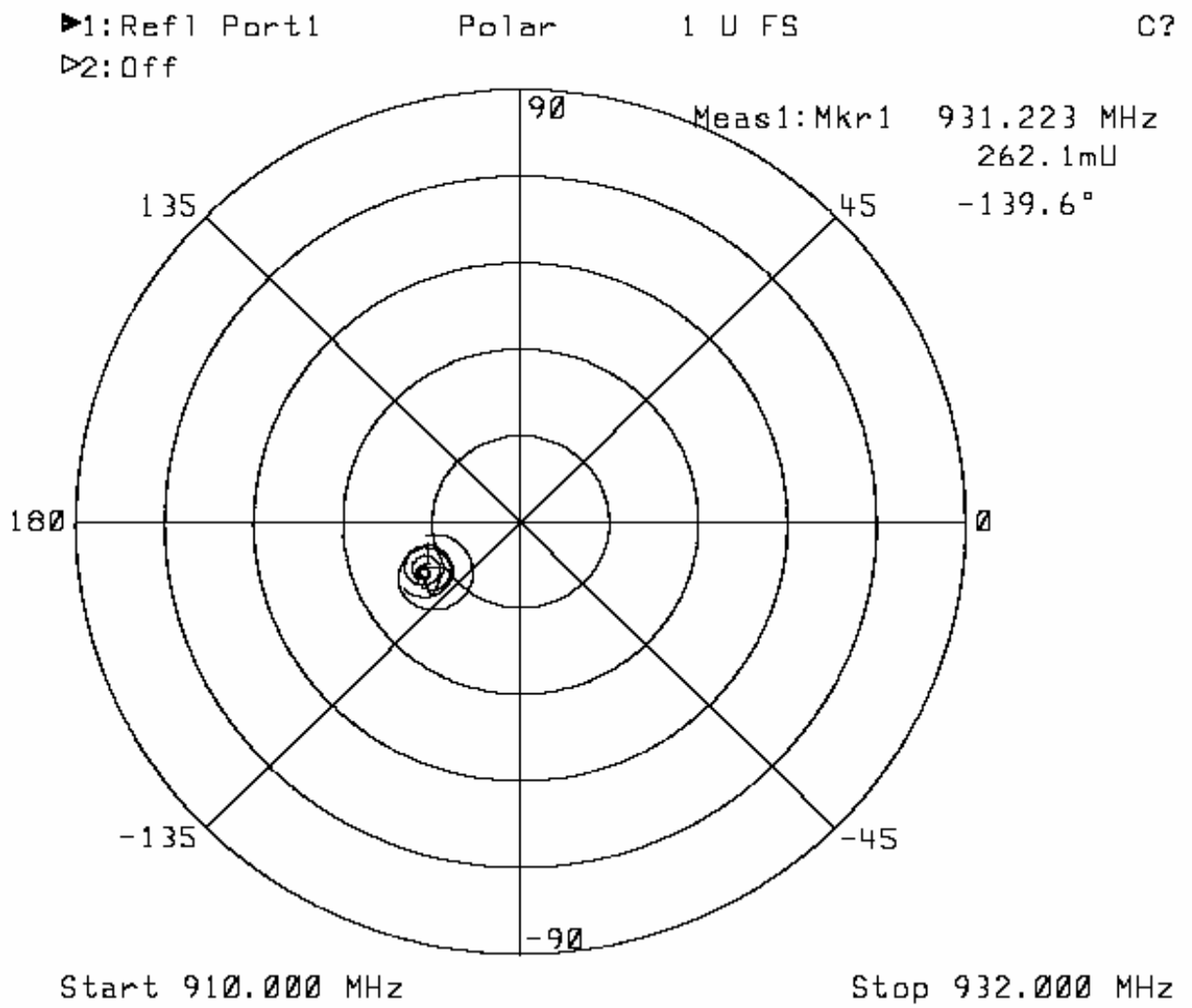


Start 910.000 MHz

Stop 932.000 MHz

1:Mkr (MHz)	Ohm	Ohm	2:Mkr (MHz)	dB
1> 931.223	31.67	-11.64		

Figura B.4 - Impedância medida (carta de Smith)



1: Mkr (MHz)	U	Deg	2: Mkr (MHz)	dB
1 > 931.223	262.1m	-139.6		

Figura B.5 - Impedância medida (diagrama polar)

APÊNDICE C

O USO DA REDE NEURAL

Referenciando-se ao Capítulo 3 foi usada uma rede neural tipo algoritmo *back propagation* com as características 11-n-1, onde “n” é o numero de neurônios intermediários ou camada intermediária ou escondida que no nosso caso – para verificação de precisão – teve valores de: 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 e 50. O 11 é o número de entradas e 1 o número de saídas.

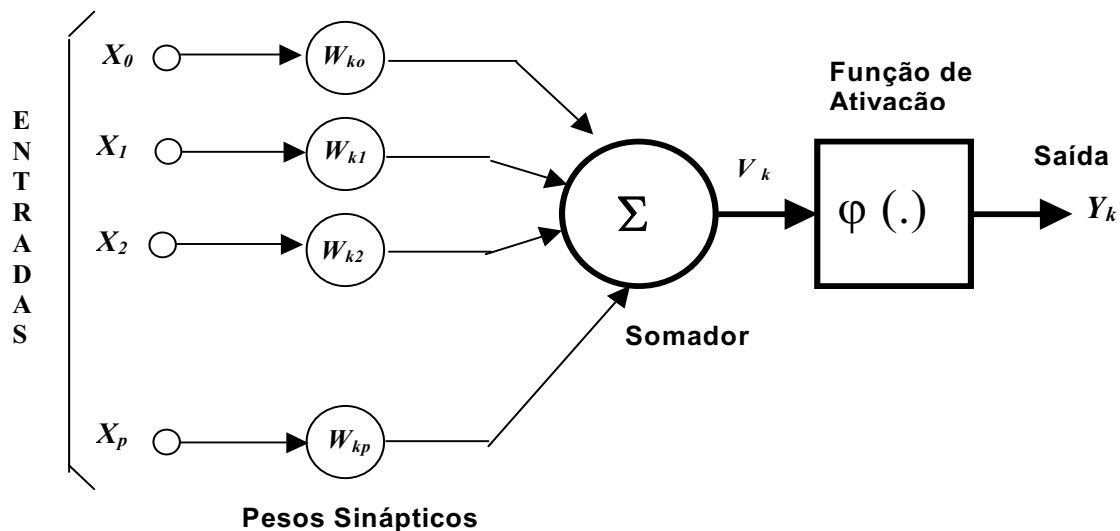


Fig. C.1 – Diagrama de blocos de um neurônio artificial.

A seqüência de uso foi o seguinte, para o primeiro caso:
Características técnicas ⇒ relevo topográfico (extraídos do Caso 1) + Outros pontos de relevo + medições (Caso 1) ⇒ Rede Neural ⇒ medições previstas ⇒ plotagem de nova curva ⇒ comparação com valores obtidos nas medições.

Como por exemplo para 1 Km a partir do ponto de emissão (Tabela C.1), tem-se os pontos de radiais de 1 Km com os respectivos campos medidos.

Para cada grupo de pontos (1, 5 ou 10 Km) a ser estudado temos 10 pontos originais de entrada mais 1 que é de informação de relevo do banco de dados conhecido com o respectivo campo medido fazendo assim 11 pontos de entrada (ver valores da Radial 1 Km, por exemplo), motivando-se assim o “11” inicial da rede neural. Esta rede é “treinada” com estes valores, ou seja, com todos os pontos da Tabela C.1 com seus respectivos campos medidos. Após isto entram-se com os valores da Tabela C.2 que são outros valores de outras radiais porém sem medições. Com o treinamento da rede e a inclusão destes pontos tem-se valores estimados em cada radial, cuja média será o valor atribuído do campo a 1 Km. O valor do campo calculado converge na saída da Rede em um ponto que é o “1” de 11-n-1. Esta convergência é feita após a atribuição do Erro que admitiremos (em torno de E-07). Após isto erro menor foi considerado para verificação e checagem (em torno de E-04) . Com isto a rede efetua várias interações (Épocas) entre a saída e a entrada e nos dará um valor dentro do especificado. Nas tabelas C.4 vemos o tempo em que algumas interações e treinamentos foram feitos (em segundos).

Variou-se também o número de camadas intermediárias, o “n” de 11-n-1. Como se pode verificar, como exemplo, na tabela C.4, as simulações com 20; 25 e 30 neurônios nota-se que não existe uma relação direta de número de camadas intermediárias versus tempo.

Tabela C.1 – Dados do terreno para radiais de 1 Km, com altitudes em metros, com valores de campo medido em dBmW.

PONTO(Km)	Radial 1	Radial 2	Radial 3	Radial 4	Radial 5	Radial 6	Radial 7	Radial 8
0	92	92	92	92	92	92	92	92
0,1	33	33	33	33	33	33	33	33
0,2	33	33	33	33	33	33	33	33
0,3	33	33	32	29	26	33	14	33
0,4	33	26	31	31	35	33	14	15
0,5	12	28	31	36	32	34	14	15
0,6	11	27	32	35	33	29	10	12
0,7	0	26	32	36	33	30	10	10
0,8	0	26	40	36	33	30	9	4
0,9	0	27	40	36	33	29	8	4
1	0	29	40	37	41	30	5	0
Campo medido em dBmW	-36	-57	-50	-14	-54	-48	-45	-38

Tabela C.2 – Dados do terreno para radiais de 1 Km, com altitudes em metros, com valores de campo medido em dBmW a ser determinado pela rede neural.

PONTO(Km)	Radial 1	Radial 2	Radial 3	Radial 4	Radial 5	Radial 6	Radial 7	Radial 8	Radial 9	Radial 10
0	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92
0,1	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33
0,2	18	33	18	17	16	33	23	25	25	25
0,3	16	16	17	17	18	22	24	25	26	30
0,4	15	16	12	16	17	21	34	35	35	35
0,5	16	14	12	14	16	21	29	31	32	32
0,6	13	12	11	13	15	21	29	33	34	34
0,7	9	9	9	11	16	32	31	33	34	35
0,8	9	4	8	10	15	32	31	33	34	35
0,9	7	4	0	9	14	27	30	41	35	35
1	5	0	0	5	13	28	30	41	41	41
Campo dBmW	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?

Após a entrada destes dados e treinada a rede tivemos os seguintes resultados (para 1 Km) (Tabela C.3)

Tabela C.3 – Valores das potências em dBmW estimados pela rede neural para as radiais de 1 a 10, com média geral apresentada para cada radial e com “n” variando de 5 a 50.

5 -37,9558 -29,7928 -28,8876 -41,9834 -55,0107 -58,5036 -46,3124 -47,3163 -44,4134 -46,1314
 10 -41,3209 -30,7012 -35,9828 -44,9318 -56,0989 -51,4570 -49,3544 -50,5762 -49,2319 -51,5050
 15 -43,2636 -33,3441 -36,2268 -46,5169 -57,4772 -55,4258 -50,5824 -50,8044 -46,8652 -46,5142
 20 -39,0073 -35,1468 -33,2712 -40,3554 -48,3463 -49,4137 -41,0905 -44,6129 -42,0687 -43,5425
 25 -38,0399 -34,8294 -31,8830 -39,9003 -49,2617 -56,7079 -46,5696 -47,1378 -44,4760 -44,7774
 30 -40,8070 -33,4380 -36,2950 -42,9735 -53,8442 -52,1720 -49,8571 -48,6158 -48,8413 -50,6882
 35 -37,8534 -36,2962 -32,0279 -39,3876 -48,4459 -58,3190 -46,4104 -46,1486 -43,7036 -43,9354
 40 -40,6008 -32,2739 -23,7460 -43,8437 -53,7524 -44,9031 -45,7706 -49,3536 -44,9830 -45,9596
 45 -39,2136 -38,5221 -37,5391 -39,4580 -41,0636 -43,3227 -43,4387 -43,7639 -43,7392 -43,7542
 50 -32,9115 -35,5957 -28,1270 -34,5518 -43,7259 -57,6565 -45,1219 -45,5371 -42,6985 -42,9314
 -39,0974 -33,9940 -32,3986 -41,3902 -50,7027 -52,7881 -46,4508 -47,3866 -45,1021 -45,9739

Os valores de campo obtidos acima são consequência de aplicação dos valores abaixo na rede neural, onde foram fixados os erros admitidos (Tabelas C.4; C.5; C.6; C.7 e C.8)

Tabela C.4 – Cálculo de campos, erros e épocas em simulação 1

	Valor da Potência Estimada	Erro Obtido	Número de Épocas
	1 Km		
5	-43,8887	8,38E-07	8927
10	-43,1491	7,72E-07	10101
15	-43,8337	9,11E-07	10044
20	-43,6725	9,57E-07	9252
25	-43,9132	9,78E-07	30914
30	-43,7640	7,17E-07	9138
35	-43,7523	8,80E-07	12714
40	-43,9054	6,13E-07	26549
45	-42,7593	9,14E-07	12452
50	-42,7544	5,15E-07	9446
Média	--43,5377	8,095E-07	13953,7

Tabela C.5 – Cálculo de campos, erros e épocas em simulação 2

	Valor da Potência Estimada	Erro Obtido	Número de Épocas
	1 Km		
5	-43,6706	9,37E-07	9179
10	-43,6756	9,20E-07	10250
15	-43,6724	9,79E-07	9850
20	-43,6674	5,71E-07	10156
25	-43,8455	9,99E-07	10267
30	-43,9076	5,78E-07	13207
35	-43,6531	8,84E-07	16012
40	-43,6593	9,80E-07	13315
45	-43,8035	8,48E-97	20729
50	-43,8356	7,24E-07	17825
Média	-43,73906	8,420E-07	13082

Tabela C.6 – Cálculo de campos, erros e épocas em simulação 3

	Valor do Campo Estimado	Erro Obtido	Número de Épocas
	1 Km		
5	-43,8335	8,71E-07	10360
10	-43,6642	6,63E-07	9790
15	-43,6504	8,10E-07	8620
20	-43,7150	9,82E-07	14071
25	-43,6882	9,90E-07	12097
30	-43,6646	8,36E-07	12166
35	-43,6923	9,25E-07	10837
40	-43,6501	9,80E-07	13010
45	-43,6318	9,64E-97	14212
50	-43,6383	9,59E-07	10677
Média	-43,6842	8,9807E-07	11587,6

Tabela C.7 – Cálculo de campos, erros, épocas e tempo em simulação 4

	Valor do Campo Estimado	Erro Obtido	No. de Épocas	Tempo de Programação em Segundos
	1 Km			
5	-43,8134	9,59E-07	9815	74,88
10	-43,8233	9,49E-07	9935	70,09
15	-43,8111	9,90E-07	11338	96,34
20	-43,6692	9,50E-07	13766	133,8
25	-43,8244	8,94E-07	9711	81,51
30	-43,8315	7,49E-07	11195	9138
35	-43,6573	8,37E-07	23891	345,53
40	-43,6775	8,31E-07	17145	231,02
45	-43,6771	9,19E-97	17497	237,99
50	-43,6384	8,90E-07	8808	93,54
Média	-43,7424	8,9743E-07	13310,1	147,317

Tabela C.8 – Cálculo de campos, erros, épocas e tempo em simulação 5

	Valor do Campo Estimado	Erro Obtido	No. de Épocas	Tempo de Programação em Segundos
	1 Km			
5	-43,7568	8,40E-07	8859	48,94
10	-43,6781	9,27E-07	9180	51,36
15	-43,6728	9,20E-07	9446	58,64
20	-43,6646	8,80E-07	14256	111,5
25	-43,8121	8,32E-07	11124	82,61
30	-43,6693	7,63E-07	15404	198,72
35	-43,6657	7,08E-07	12412	137,48
40	-43,8115	9,96E-07	21887	263,53
45	-43,7686	8,63E-97	15210	177,24
50	-42,6529	9,68E-07	21527	306,1
Média	-42,6172	8,6963E-07	13930,5	143,608

C – 1 – Ajuste do Erro Obtido

Para otimização do tempo computacional diminui-se o erro obtido estimado para a ordem de EE-04, tabulando-se os dados como se apresentam na Tabela C.10 e para comparação os dados considerados com erro de EE-07, já utilizados. Note-se que apresentam-se somente os valores referentes a 1 Km.

Tabela C.9 – Cálculo de campos, erros (ordem de EE-07) e tempo

	Valor da Potência Estimada	Erro Obtido	No. de Épocas	Tempo de Programação em Segundos
	1 Km			
5	-42,7568	8,40E-07	8859	48,94
10	-42,6781	9,27E-07	9180	51,36
15	-42,6728	9,20E-07	9446	58,64
20	-42,6646	8,80E-07	14256	111,5
25	-42,8121	8,32E-07	11124	82,61
30	-42,6693	7,63E-07	15404	198,72
35	-42,6657	7,08E-07	12412	137,48
40	-42,8115	9,96E-07	21887	263,53
45	-42,7686	8,63E-97	15210	177,24
50	-42,6529	9,68E-07	21527	306,1
Média	-42,7152			146,63

Tabela C.10 – Cálculo de campos, erros (ordem de EE-04) e tempo

	Valor da Potência Estimada	Erro Obtido	No. de Épocas	Tempo de Programação em Segundos
	1 Km			
5	-42,6622	7,30EE-04	4334	42,57
10	-42,6523	7,96EE-04	2961	27,90
15	-42,6556	9,05EE-04	2983	33,12
20	-42,6466	9,35EE-04	31076	36,58
25	-42,7977	8,55EE-04	3948	53,55
30	-42,7077	9,10EE-04	2683	38,23
35	-42,6766	9,05EE-04	5604	97,61
40	-42,8033	9,87EE-04	6257	123,75
45	-42,7486	8,67EE-04	9158	214,21
50	-42,6829	7,32EE-04	12464	323,12
Média	-42,7033			99,34

C - 2 – Conclusão

Partindo-se do princípio que os valores obtidos para a potência com um Erro de (EE-07) são os corretos pode-se observar que calculando-se este mesmos valores para um Erro de (EE-04) teve-se uma variação no cálculo da potência de 0,02786% para menos

(-42,71 dBmW para -42,70 dBmW). Entretanto o tempo computacional diminuiu de 47,6% (143,63 segundos para 99,34 segundos), sendo pois os cálculos para um Erro de (EE-04) recomendados.

APÊNDICE D

ESTATÍSTICA DE 1ª. E 2ª ORDENS

D.1 – Medidas de Dispersão

A análise numérica dos resultados obtidos pelos vários métodos tende a se dispersar em torno de um valor médio, denominado de *variância* ou *dispersão* [48], [49] apresentado usualmente por σ^2 .

A Média, \bar{X} , de um conjunto de N valores X_1, X_2, \dots, X_N é definida como

$$\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^N X_j}{N} \quad (\text{d.1})$$

O *Desvio Médio*, DM , de um conjunto de N valores X_1, X_2, \dots, X_N é definido como

$$DM = \frac{\sum_{j=1}^N |X_j - \bar{X}|}{N} \quad (\text{d.2})$$

em que \bar{X} é a média aritmética dos valores dados e $|X_j - \bar{X}|$ é o valor absoluto do desvio de X_j em relação a \bar{X} .

O *Desvio Padrão*, σ , de um conjunto de N de valores medidos X_1, X_2, \dots, X_N é dado por

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})^2}{N}} \quad (\text{d.3})$$

onde X_j representa o desvio de cada um dos valores em relação a média \bar{X} . Portanto, σ é a *raiz média quadrática dos desvios*, em relação à média, também denominado *desvio da raiz média quadrática*.

A Variância é definida como sendo o quadrado do desvio padrão e dada como

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})^2}{N} \quad (\text{d.4})$$

A distribuição normal é uma distribuição contínua de probabilidade, também denominada *distribuição, curva normal* ou *distribuição de Gauss*. Este parâmetro estatístico, usualmente denotado por $f_X(x)$, é definido pela seguinte função densidade de probabilidade (fdp) [50]:

$$f_X(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-1/2(x-\bar{X})^2/\sigma^2} \quad (\text{d.5})$$

onde \bar{X} é a média e σ é o desvio padrão.

Na Figura D.1 está ilustrada esta curva normal de densidade de probabilidade. Para o cálculo da probabilidade de X estar situado entre a e b , representada por $P\{a < X < b\}$, com $a < b$, a partir desta função normal, basta determinar-se a área sob a curva, compreendida entre essas duas coordenadas $X = a$ e $X = b$. Quando a variável X é representada em termos de $z = (X - \bar{X})/\sigma$, ou unidade reduzida, a equação (e.5) assume uma forma reduzida, como mostrado a seguir [50]

$$f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-1/2z^2} \quad (\text{d.6})$$

Neste caso, diz-se que z está normalmente distribuído, com média zero e variância igual a 1.

Um gráfico desta curva normalizada está mostrado na Figura D.1, onde estão indicadas as áreas incluídas, para z variando de $(-1$ a $+1)$, $(-2$ a $+2)$ e $(-3$ a $+3)$,

que correspondem, respectivamente, a 62,27%, 95,45% e 99,73% da área total que é unitária.

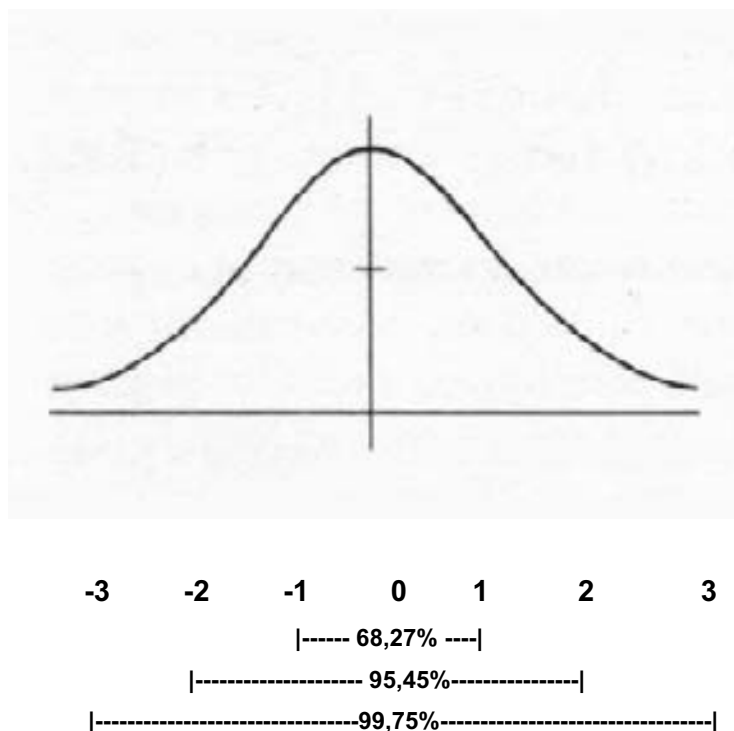


Figura D.1 – Curva da distribuição normal.

A comparação quantitativa dos modelos é feita analisando-se as estatísticas de erro de cada modelo em relação aos valores medidos. O erro médio absoluto (\bar{E}), de (e.8), entre os valores de medidas e das predições, é calculado para cada faixa de distâncias através de:

$$E_j = |MF_j - K_j| \quad (d.7)$$

onde “j” é a faixa de distância; MF_j é a média da faixa “j”; K_j é o valor predito por um determinado modelo para a faixa “j”.

O *Erro Médio Absoluto* é calculado como

$$\bar{E} = \frac{1}{F} \sum_{j=1}^F E_j \quad (d.8)$$

onde F é o número total de faixas medidas e “ j ” é a faixa da distância.

O *Erro RMS* é obtido a partir das equações (e.3) e (e.8):

$$E_{RMS} = \sqrt{(\bar{E})^2 + \sigma^2} \quad (d.9)$$

D.2 – A Importância das Distribuições de Probabilidade nos Modelos de Propagação de Ondas de Rádio

Os estudos realizados na análise da propagação de ondas de rádio num ambiente móvel têm demonstrado que além dos dados normais do meio ambiente para o cálculo do sinal recebido, outros parâmetros devem ser considerados, como variações em tempo, espaço e frequência [51].

O comportamento aleatório dos sinais desejados e interferentes mostra o papel decisivo que deve existir na análise estatística para a confiabilidade do sistema e na escolha adequada dos parâmetros. É essencial conhecermos a extensão e a rapidez das flutuações do sinal a fim de poder especificar parâmetros como o tipo de modulação, a codificação de canal, etc., Muitas vezes para descrevermos o desempenho do sistema de comunicação é suficiente observar a série de tempo da flutuação do sinal e caracterizar estas flutuações como um processo estocástico. Modelar flutuações do sinal com a finalidade do estudo do desempenho do sistema de comunicação requer também o conhecimento dos mecanismos da interação das ondas de rádio com o meio ambiente.

A composição e o estado físico da atmosfera são altamente variáveis no espaço e no tempo. Isto requer o uso de métodos estatísticos para caracterizar os vários parâmetros físicos que descrevem o meio de propagação (canal de propagação), bem como os parâmetros elétricos que definem o comportamento do sinal e os processos da interação entre estes parâmetros.

Os processos estocásticos das distribuições de probabilidade são descritos geralmente por uma função densidade de probabilidade (fdp).

As principais funções densidade probabilidade (fdp) empregadas em sistemas de comunicações móveis [51]:

- Distribuição Normal ou Gaussiana;
- Distribuição Log-normal;
- Distribuição de Rayleigh;
- Distribuição Combinada Log-normal e Rayleigh;
- Distribuição de Nakagami-Rice;
- Distribuição χ^2 de Pearson

A função probabilidade, $P(X_1, X_2)$, é definida matematicamente como

$$P(X_1, X_2) = \int_{x_1}^{x_2} f_X(x) dx \quad (d.10)$$

onde $f_X(x)$ é a fdp e $P(X_1, X_2)$ é a probabilidade que um dado qualquer obtido durante a medida, pertença ao intervalo $[X_1, X_2]$, e X representa a grandeza que está sendo observada.

Determinadas grandezas podem depender de vários valores da função fdp. Por exemplo, a potência estimada em determinado ponto ou a perda de propagação neste ponto, pode ser função da fdp referentes à altitude e a da potência medida na região em estudo. Neste caso teremos não uma fdp isolada, mas uma fdp conjunta [26].

Se $p_X(x)$ e $p_Y(y)$ são variáveis aleatórias conjuntas independentes, a fdp conjunta das duas pode ser escrita como [26], [48]:

$$p_{xy} = p_X(x) p_Y(y) \quad (d.11)$$

propriedades da fdp:

$$f(x) \geq 0 \quad (d.12)$$

$$\int f(x).dx = 1 \quad (d.13)$$

$$\sum p(X_1, X_2) = 1 \quad (d.14)$$

Quando não existe visibilidade entre um ponto de transmissão e um ponto de recepção e o sinal recebido é composto de múltiplas reflexões de intensidades semelhantes diz-se que esta potência recebida segue uma distribuição de Rayleigh ou que estamos num ambiente Rayleigh. Se a Função Densidade de Probabilidade da potência instantânea do sinal for dada por $r^2/2$, ou seja, r é proporcional a potência quando a potência média medida é dada por σ^2 e a potência final é dada por [50], [51].

$$P_r(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) \quad (\text{d.15})$$

A função **rand** (randômica ou aleatória) é uma função que assume valores diversos [28], [29]. Neste estudo esta função assume valores reais no intervalo fechado $[-1, +1]$.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] H. Suzuki, "A Statistical Model for Urban Radio Propagation," IEEE Transactions on Communications, vol. Com-25, no. 7, Jul. 1977
- [2] J. E. Dietert e B. Rembold. (2000) Stochastic channel model for outdoor applications based on ray-tracing simulations. COST 259, TD(00)005. [Online]. Available: <http://www.lx.it.pt/cost259/>.
- [3] A. Patnalk, D. E. Anagnostou, R. K. Mishra, C. G. Christodoulou, e J. C. Lyke, "Applications of Neural Networks in Wireless Communications," IEEE Antenas and Propagation Magazine, Vol. 46, No. 3, June 2004.
- [4] Q. J. Zhang e K. C. Gupta, Neural Networks for RF and Microwave Design, Norwood, MA, Artech House, 2000.
- [5] M. Franceschetti, J. Bruck e L.J. Schumlman, "A Random Walk Model of Wave Propagation", IEE Transaction on Antennas and Propagation, Vol. 52, no. 5 May 2004.
- [6] T. Kurner, D. J. Cichon, e bruckW.Wiesbeck, "Concepts and results for 3D digital terrain-based wave propagation models: An overview," IEEE J. Select. Areas Commun., vol. 11, pp. 1002–1012, Sept. 1993.
- [7] T. S. Rappaport, Wireless Communications – Principles and Pactice, Prentice Hall – Communications Engineering and Emerging Technologies Series, 1996.
- [8] G. L. Stuber, Principles of Mobile Communications, 2nd ed. Norwell, MA: Kluwer, 2001.
- [9] N. C. Goncalves e L. M. Correia, "A propagation model for urban microcellular systems at the UHF band," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 49, pp. 1294–1302, July 2000.
- [10] L. Juan-Llacer, L. Ramos, e N. Cardona, "Application of some theoretical models for coverage prediction in macrocell urban environments," IEEE rans. Veh. Technol., vol. 48, pp. 1463–1468, Sept. 1999.

- [11] Y. Oda, K. Tsunekawa, e M. Hata, "Advanced LOS path-loss model in microcellular mobile communications," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 49, pp. 2121–2125, Nov. 2000.
- [12] A. J. Goldsmith e L. J. Greenstein, "A measurement-based model for predicting coverage areas of urban microcells," IEEE J. Select. Areas Commun., vol. 11, pp. 1013–1023, Sept. 1993.
- [13] W.C.Y. Lee e D.J.Y. Lee, "Microcell prediction in dense urban area," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 47, pp. 246–253, Feb. 1998.
- [14] A. M. D. Turkmani e A. F. Toledo, "Propagation into and within buildings at 900, 1800, and 2300 MHz," in IEEE Veh. Technol. Conf., pp. 633–636, Dec. 1992.
- [15] D. J. Y. Lee e W. C. Y. Lee, "Propagation prediction in and through buildings," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 49, pp. 1529–1533, Sept. 2000.
- [16] N. DeMinco e P.M. McKenna, "Evaluation and comparative analysys of radiowave propagation and measurements", Applied Computational Eletromagnetics Society Symposium Digest, Vol. X, Mar. 2003
- [17] N. Papadakis, A. Kanatas, e P. Constantinou, "Microcellular Propagation Measurements and Modeling Using Ray Tracing Techniques," Proc. 44th IEEE Veh. Tech. Confer., Vol. 3, pp. 1767-1770, Jun. 1994.
- [18] F. J. S. Moreira, "A MFIE-Based Prediction for UHF Vertically-Polarized Wave Propagation over Irregular Terrains," 2001 IEEE Antennas and Propagation International Symposium Digest, Boston, MA, Vol. 1, pp. 456-459, Jul. 2001.
- [19] M.D. Yacoub, "Foundation of Mobile Radio Engineering", CRC Press, 1993
- [20] A.V. Popov, V.A. Vinogradov, N.Y. Zhu e F.M. Landstorfer, "3D Parabolic Equation Model of EM Wave Propagation in Tunnels", Eletronic Letters , Vol. 35, No. 11, 27th , May 1999.
- [21] H.Harada, R.Prasad, "*Simulation and Software Radio for Mobile Communications*", Artech House, Boston, 2002
- [22] S.R. Saunders e F.R. Bonar, "Prediction of Mobile Radio Waves Propagation Over Building of Irregular Heights and Spacing", IEEE Transaction Antennas and Propagation, Vol 42, No. 2, Frebruary 1994.
- [23] C.A. Balanis, *Antenna Theory – Analysis and Design*, John Wiley & Sons, 1998
- [24] ANATEL, *Resolução no. 235*, de 21 de setembro de 2000
- [25] G.C. Hess, "*Land-Mobile Radio System Engineering*", Artech House, 1993

- [26] Walfish, J. e Bertoni, H. L., “A Theoretical Model of UHF Propagation in Urban Environments”, IEEE Trans. Antennas Propag., 1998, 36, (12), pp. 1788-1796.
- [27] Grosskopf, R., “Prediction of Urban Propagation Loss”, IEEE Trans. Antenna and Propag. , vol. 42, no. 5, 1994.
- [28] S. Haykin, *Redes Neurais, Princípios e Prática*, Bookman Companhia Editora, 1999
- [29] MATLAB® - The Language of Technical Computing – Version 6.1.0 – May 18, 2001 – The MathWorks, Inc.
- [30] K. Allsebrook e J.D. Parson “Mobile Radio Propagation in British Cities at Frequencies in VHF an UHF Bands”, IEEE Transaction on Technology, Vol VT-26, no. 4, November 1977.
- [31] A. Neskovic, N. Neskovic e G.Paunovic, “A Field Strength Prediction Model Based on Artificial Neural Networks”, Proc. 9th IEEE Med. Electro. Conf. – MELECON, Tel Aviv – Israel, May 1998.
- [32] W. Zhang e N. Moayeri, “Formulations of Multiple Diffraction by Buildings and Trees for Propagation Predications”, Document Number IEEE 802.16cc-99/28, presented at Session # 4 IEEE 802.16.2 Meeting, Kauai, Hawaii, November 7-12, 1999.
- [33] S. R. Saunders, “Antennas and Propagation for Wireless Communications Systems” – John Willey and Sons, Ltd, 1999, Chapter 10
- [34] Y. Okumura, E. Ohmori, T. Kawano e K. Fukuda, “Field Strength and its variability in VHF and UHF land-mobile radio service”, Rev. Elec. Commun. Lab., vol 16, no. 9-10, pp 825-873, 1968.
- [35] M.Hata, “Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services”, IEEE Trans. on Vehicular Technology, Vol. VT-29, no. 3, August, 1980
- [36] COST Doc. 262/88, COST 231 Project Draft Memorandum of Understanding, Brussels, Belgium, Dec. 1988
- [37] SPRING 3.4 – Geoprocessamento – www.dpi.inpe.br, Janeiro 2005
- [38] P. M. Baldassarro, “RF and GIS: Field Strength Prediction for Frequencies between 900 MHz and 28 GHz”(Thesis submitted to the Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University) – August 15, 2001 – Blacksburg – Virginia - EUA
- [39] “*Performance Specification for Digital Terrain Elevation Data (DTED)*”,

Defense Mapping Agency, ATC, Stop A-13, 8613, Lee Highway Fairfax, VA 22031-2137, 2000

- [40] M.L.Norton, “*Disk-File Format for 3-Second Digital Terrain Elevation Data*”, Norton Engineering, 10002 McDuff Court, Vienna, VA, USA, 2002
- [41] SRTM-DTED ® (Shuttle Radar Topography Mission) – Level 1 Data (3-arc sec) (<http://edc.usgs.gov/products/elevation.html>), Fevereiro 2006
- [42] CEMS & RCES (Computer Engineering Microwave Systems), Norton Engineering, 10002 McDuff Court, Vienna, VA, USA, 2002
- [43] H.W. Hayt Jr, *Eletromagnetismo*, 4a Edição, pp 142-148, – McGraw Hill, 1995
- [44] Neural Network Toolbox User’s Guide, 1992-1998, by The Math Word®
- [45] P.A.G. Guerra, *Geoestatística Operacional* – Departamento Nacional da Produção Mineral, Ministério das Minas e Energia, Brasília, DF, 1988.
- [46] Curve Fitting Toolbox User’s Guide, 2001-2002, The Math Word®
- [47] P. Amaleudu, D.E. Anaguostu, R.K. Mishra e J.C. Lyke, “Application of Neural Networks in Wireless Communications”, IEEE Antennas and Propagation Magazine – Vol. 46, no. 3 – June 2004
- [48] M.R. Spiegel, “*Estatística*”, Schaum Publishing Company, Nova York, 1968
- [49] Taub e Schilling, “Principles of Communications Systems”, McGraw-Hill Book Company, 1971, Capítulo 2.
- [50] M.S. Alencar, “Telefonia Celular Digital”, Érica Editora Ltda., 2004
- [51] Recommendation ITU-R P.1057-1, “Probability Distributions Relevant to Radiowave Propagation Modelling” - ITU, Genebra, Suíça, 2001.