

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MÉTODO DE INVERSÃO PARA A OBTENÇÃO DOS
PARÂMETROS ELÉTRICOS DO SOLO PARA REGIÃO
AMAZÔNICA BASEADO EM MEDIÇÕES E USANDO
EQUAÇÕES PARABÓLICAS

RÔMULO AUGUSTO NASCIMENTO DE OLIVEIRA

TD 11/2015

UFPA/ ITEC/ PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém -Pará- Brasil
2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

RÔMULO AUGUSTO NASCIMENTO DE OLIVEIRA

MÉTODO DE INVERSÃO PARA A OBTENÇÃO DOS
PARÂMETROS ELÉTRICOS DO SOLO PARA REGIÃO
AMAZÔNICA BASEADO EM MEDIÇÕES E USANDO
EQUAÇÕES PARABÓLICAS

TD: 11/2015

UFPA/ ITEC/ PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém -Pará- Brasil
2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

RÔMULO AUGUSTO NASCIMENTO DE OLIVEIRA

MÉTODO DE INVERSÃO PARA A OBTENÇÃO DOS
PARÂMETROS ELÉTRICOS DO SOLO PARA REGIÃO
AMAZÔNICA BASEADO EM MEDIÇÕES E USANDO
EQUAÇÕES PARABÓLICAS

Tese submetida à Banca
Examinadora do Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Elétrica
da UFPA para a obtenção do Grau
de Doutor em Engenharia Elétrica
na área de Telecomunicações

UFPA/ ITEC/ PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém -Pará- Brasil
2015

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFPA

Oliveira, Rômulo Augusto Nascimento de , 1966-
Método de inverso para a obtenção dos parâmetros
elétricos do solo para regiões amazônica baseado em
medições e usando equações parabólicas / Rômulo Augusto
Nascimento de Oliveira. - 2015.

Orientador: Gervásio Protásio dos Santos
Cavalcante;

Coorientadora: Fátima Nazaré Baraúna
Magno.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do
Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belém,
2015.

1. Equações diferenciais parabólicas. 2.
Ondas de rádio - propagação - métodos
estatísticos. 3. Estatística matemática. I.
Título.

CDD 22. ed. 515.3534

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**“MÉTODO DE INVERSÃO PARA A OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS ELÉTRICOS DO SOLO
PARA REGIÃO AMAZÔNICA BASEADO EM MEDIÇÕES USANDO EQUAÇÕES
PARABÓLICAS”**

AUTOR: RÔMULO AUGUSTO NASCIMENTO DE OLIVEIRA

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO
COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, SENDO
JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA
ELÉTRICA NA ÁREA DE TELECOMUNICAÇÕES.

APROVADA EM: 20/08/2015

BANCA EXAMINADORA:



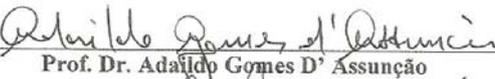
Prof. Dr. Gervásio Protásio dos Santos Cavalcante

(Orientador – PPGEE/UFGA)



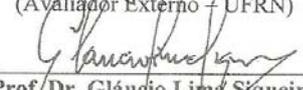
Prof. Dr. Fátima Nazaré Baraúna Magno

(Avaliador Externo ao Programa – UFGA)



Prof. Dr. Adalberto Gomes D' Assunção

(Avaliador Externo – UFRN)



Prof. Dr. Gláucio Lima Siqueira

(Avaliador Externo – PUC/RJ)

VISTO:

Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pellaes

(Coordenador do PPGEE/ITEC/UFGA)

AGRADECIMENTOS

A Deus que apesar de minha pouca fé nunca se esqueceu de mim, sempre enviando aquele bom anjo da guarda para iluminar o meu caminho e a minha inteligência.

Aos meus queridos pais, Diniz e Raimunda, que nunca deixaram de me apoiar em todos os meus projetos, sempre me amando com um amor incontestável.

A minha estimada vovó, Diquinha, que com suas orações poderosas sempre pedindo por mim e meus irmãos.

Aos meus filhos que me deixaram trabalhar e me deram grandes momentos de alegria.

À todos os meus familiares e amigos pelo constante incentivo e amparo na construção deste trabalho.

Ao professor Gervásio Cavalcante, pela orientação segura e por nunca deixar de acreditar no meu sucesso neste trabalho.

Aos professores João Furtado, Fátima Magno e Klaus Cozzolino no precioso trabalho de co-orientação.

Aos professores do IFPA que ajudaram com sua camaradagem, companheirismo e tranquilidade nas horas mais difíceis.

Aos demais professores do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica.

A todos os alunos e pesquisadores do Laboratório de Computação e Telecomunicações.

Ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia-Comunicações sem Fio (INCT-CSF).

Que Deus abençoe todos vocês.

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	
1.1 – Aspectos Gerais	1
1.2 – Motivação e Caracterização do Problema	2
1.3 – Objetivo	3
1.4 – Trabalhos Relacionados	3
1.5 – Contribuição da Tese	9
1.6 – Organização do Trabalho	10
2 - MÉTODO DE INVERSÃO USANDO A MINIMIZAÇÃO DOS MÍNIMOS QUADRADOS PONDERADOS	
2.1 – Introdução	11
2.2 - Função Objetivo	11
2.3 - Métodos de Otimização	12
2.3.1 - Método de Newton	13
2.3.2 - Método Modificado de Newton	15
2.3.3 - Método de Gauss-Newton	15
2.3.4 - Método de Máxima Descida	15
2.3.5 - Método de Busca Unidimensional	16
2.4 - Terminação do processo de iteração	16
2.5 - Abordagem Bayesianas para a minimização dos Mínimos Quadrados Ponderados	16
2.6 – Conclusão	18
3 - MODELOS DE PREDIÇÃO DA PERDA DE PROPAGAÇÃO PARA A FLORESTA	

3.1 – Introdução	19
3.2 – Modelo de Burrows	20
3.3 – Modelo de J. Wait	20
3.4 – Modelo de T. Tamir	20
3.5 – Modelo de Sachs e Wyatt	22
3.6 - Modelo de T. Tamir e D. Dence	22
3.7 – Modelo de Rosenbaum e Bowles	23
3.8 – Modelo de Percurso Misto	23
3.9 – Modelo de G.P.S. Cavalcante	24
3.10 – Modelo de L.W. Li	24
3.11 – Modelo de Multiraios	25
3.12 - Modelo de Equações Parabólicas	27
3.12.1 – Introdução	27
3.12.2 – O Modelo	28
3.13 – Conclusão	34
4 – RESULTADOS	
4.1 – Introdução	35
4.2 – Cenário das Medições	35
4.3 – Metodologia Teórica	38
4.4 - Análise Quantitativa	39
4.5 – Resultados Obtidos para a região Centro Oeste	42
4.5.1 –Cenário	42
4.5.2 – Setup das Medições	42
4.5.3 – Análise Comparativa	45
4.6 – Conclusão	46

5 – CONCLUSÃO	48
REFERÊNCIAS	50
ANEXO A – OUTROS TRABALHOS PUBLICADOS	54

LISTA DE FIGURAS

1.1 – Curva do Erro Médio Quadrático versus condutividade para a Rota 01	7
1.2 - Intensidade de campo elétrico versus distância para a Rota 01	8
3.1 - Modelo de Tamir	21
3.2 – Modelo de G.P.S. Cavalcante	24
3.3 - Geometria para o modelo de Multiraios:(a) vista superior, (b) vista lateral	26
3.4 – Perda de percurso com a distância para a cidade de Benfca	31
2.5 - Perda de percurso para a cidade de Marituba	32
2.6 – Perda de percurso para a cidade de Barcarena	32
4.1 - Vista da rodovia de acesso a cidade de Benfca	35
4.2 – Vista da cidade de Marituba	36
4.3 – Vista do ambiente de medições para a cidade de Barcarena	36
4.4 – Torre da antena de transmissão para a cidade de Benfca	37
4.5 –Mapa para o ambiente de medições para a cidade de Benfca	38
4.6 – Localização das rotas radiais	42
4.7 – Diagrama em blocos do M.R.U	43
4.8 – Diagrama em blocos da unidade móvel da RADIOBRAS	44

LISTA DE TABELAS

3.1 - Parâmetros do modelo	31
3.2 – Erro médio, desvio padrão e erro RMS para a cidade de Benfica	33
3.3 - Erro médio, desvio padrão e erro RMS para a cidade de Marituba	33
3.4 - Erro médio, desvio padrão e erro RMS para a cidade de Barcarena	33
4.1 – Parâmetros para a floresta nas três cidades	39
4.2 – Tipos de floresta com seus parâmetros elétricos típicos	40
4.3 – Parâmetros ótimos para a floresta nas três cidades seus erros relativos	41
4.4 – Parâmetros ótimos para as ruas nas três cidades e seus erros relativos	41
4.5 –Características do transmissor da RADIOBRAS	43
4.6 – Parâmetros elétricos estimados para o solo	45
4.7 – Condutividade elétrica do solo e erros relativos	46

RESUMO

Nos últimos anos, devido ao rápido desenvolvimento das tecnologias de rádio acesso digital, tais como a TV Digital e a radiodifusão sonora digital, acompanhado por uma forte demanda por estes tipos de serviço, tornou-se de grande importância o estudo do comportamento do campo elétrico gerado pelas emissoras que usarão estas tecnologias, bem como o conhecimento dos parâmetros elétricos envolvidos, os quais são fundamentais na determinação da área de cobertura das emissoras. Este trabalho apresenta uma metodologia de inversão através dos mínimos quadrados ponderados para a obtenção dos parâmetros elétricos equivalentes da vegetação e solo de uma região florestal típica amazônica usando o modelo baseado no formalismo das equações parabólicas para calcular a intensidade de campo elétrico recebido por um receptor móvel contido nesta região. Para validação desta metodologia, foram realizadas campanhas de medições em Benfica, Marituba e Barcarena, no Estado do Pará. Em Benfica e em Marituba foi usada a frequência de 900 MHz e em Barcarena foi utilizada a frequência de 1,8 GHz. Para os três municípios, o sistema de medição consistiu de um laboratório fixo e de uma estação móvel que foi montada para medir e armazenar os valores instantâneos da potência do sinal recebido. As medidas foram comparadas com simulações computacionais, e assim, foi possível estimar os valores ótimos para a condutividade elétrica e permissividade relativa tanto da vegetação cortada pelas rodovias de acesso às cidades, quanto do solo das rodovias através da metodologia de inversão. Foi realizada, também, uma análise quantitativa destes parâmetros com os valores encontrados na literatura, que demonstrou a eficácia da metodologia de inversão proposta. Finalizando, este trabalho apresenta os resultados obtidos com o método de inversão para um ambiente rural localizado na região central do Brasil, onde se verificou que os valores estimados para a condutividade elétrica do solo foram bem próximos dos apresentados em recentes estudos realizados para a região.

PALAVRAS-CHAVES: floresta, permissividade, condutividade, inversão, otimização.

ABSTRACT

In recent years, due to the rapid development of the technology of radio access digital such as TV Digital and digital audio broadcasting, accompanied by a strong demand for these types of services, it has become of great importance the study the electric field behavior generated by radio stations who will use these technologies as well as knowledge of electrical parameters involved, which are essential in determining of the stations coverage area. This work presents a methodology of inversion through weighted least squares to obtain the equivalent electrical parameters of the vegetation and soil of a typical Amazon forest region using the model based on the formalism of parabolic equations to calculate the electric field strength received by a mobile receiver contained within in this region. To validate this methodology, measurement campaigns were conducted in Benfica, Marituba and Barcarena, State of Pará. Since in Benfica and Marituba was used a frequency of 900 MHz and Barcarena was used the frequency of 1.8 GHz. For the three cities, the measuring system consisted of a laboratory fixed and a mobile station that has been set up to measure and store the instantaneous values of the received signal. The measurements were compared with computer simulations, and so it was possible to estimate the optimal values for the electrical conductivity and relative permittivity of the vegetation that cut the road access to the cities and of the highway soil through the proposed inversion methodology. It was also made a quantitative analysis of these parameters with the values found in the literature which demonstrated the effectiveness of the proposed methodology. Finally, this work presents the results obtained with the inversion method for a rural region located in the center of Brazil, where it was found that the estimated values for soil electrical conductivity were very close to those shown in recent studies to the region.

KEYWORDS: forest; permittivity ; conductivity; inversion; optimization

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1- ASPECTOS GERAIS

O comportamento das ondas eletromagnéticas se propagando em um determinado meio é afetado por uma série de fatores que provocam a redução da energia destas ondas, sendo que estes fatores podem ser de origem natural como: descargas atmosféricas, chuvas, vegetação, entre outros; ou provocadas pela ação do homem como: os efeitos das edificações, o ruído de motores, linhas de transmissão de energia elétrica, entre outros.

Quando o meio de propagação é uma região de extensa área florestal, como é o caso da região amazônica, vários são os mecanismos de propagação das ondas eletromagnéticas envolvidos, produzindo efeitos que provocam grande atenuação no nível do sinal transmitido, o qual varia de acordo com as variações das propriedades elétricas da vegetação (nas folhas, troncos) e solo, representadas pela condutividade elétrica e permissividade relativa. Estes dois parâmetros influenciam fortemente o desempenho de qualquer sistema de rádio a ser implantado.

Através da escolha dos valores da condutividade elétrica e permissividade relativa tanto para o solo quanto para a vegetação da região a ser estudada é possível a determinação dos parâmetros relacionados com as antenas transmissoras e receptoras, como a eficiência e tipo de polarização, além da determinação da área de cobertura desejada do sistema. Desta forma, é de fundamental importância usar valores adequados para os parâmetros elétricos do solo e da vegetação no cálculo da intensidade do campo elétrico durante o planejamento de sistemas de comunicações. Principalmente, quando estes sistemas são digitais, muito mais sensíveis, onde pequenas variações no valor do campo elétrico abaixo do seu limiar estabelecido causarão perda total do sinal no receptor.

Dentre estes sistemas digitais, destacam-se os sistemas de TV Digital e a radiodifusão sonora digital. Para a TV Digital, os três principais padrões em funcionamento no mundo são:

- O DVB que tem como características principais a múltipla programação e interatividade;
- O ATSC que privilegia uma televisão com alta definição;
- O ISDB-T (*Integrated Services Digital Broadcasting for Terrestrial*), criado em 1999 no Japão pelo grupo DIBEG (*Digital Broadcasting Experts Group*), sendo destinado a transmissão de sinais de TV Digital tanto no formato SDTV (*Standard Definition Television*) como HDTV (*high Definition Television*), para receptores fixos ou móveis.

No caso do Brasil, a transição do sistema de transmissão de televisão analógico para o digital, levou em consideração os benefícios econômicos e sociais que um país com uma grande dimensão territorial e uma população predominantemente jovem poderia alcançar, sendo que o modelo japonês ISDB-T atendia requisitos importantíssimos como a flexibilidade da transmissão hierárquica e a mobilidade.

Para o caso dos sistemas de Radiodifusão Sonora Digital, o governo brasileiro autorizou através da Agencia Nacional de Telecomunicações- ANATEL em setembro de 2005, a transmissão experimental de sinais digitais, seguindo as recomendações apresentadas na Norma Técnica NTC número 22, em frequências abaixo de 30 MHz. Onde os padrões *Digital Radio Mondiale* (DRM) e o *High Definition* (HD) foram escolhidos para o teste devido apresentarem a compatibilidade de suas faixas de frequências com as atuais faixas destinadas a radiodifusão sonora no Brasil.

1.2- MOTIVAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Para a região florestal amazônica, particularmente no Estado do Pará, onde a maioria da população é carente de infra-estrutura de telecomunicações e cujas distâncias geográficas são imensas se comparadas com outras regiões do Brasil, torna-se necessário o desenvolvimento de uma nova tecnologia de rádio acesso digital, como a radiodifusão sonora digital e TV Digital, a qual beneficiará a população através destes importantes mecanismos para o processo de democratização da cultura, do lazer, da educação e cidadania de uma forma muito mais rápida e abrangente que as atuais transmissões de rádio e de televisão analógica. Estes são os objetivos definidos como uma das metas pelo Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia-Comunicações sem Fio (INCT-CSF) para os grupos de pesquisa que se concentram na linha de desenvolvimento de modelos e medições para sistemas de comunicações digitais nas faixas de ondas médias e UHF que foram destinadas a radiodifusão sonora digital e TV Digital respectivamente.

Para a realização desta importante tarefa, há necessidade do estudo do comportamento do campo elétrico gerado pelas emissoras que usarão os sistemas de transmissão digital de TV e radiodifusão sonora na região Amazônica, bem como o conhecimento dos parâmetros elétricos do solo e da vegetação, como a condutividade elétrica e a permissividade relativa, os quais são fundamentais na determinação da área de cobertura das referidas emissoras.

Em face dessas considerações, neste trabalho é apresentada uma nova proposta de metodologia de inversão através dos mínimos quadrados ponderados para a obtenção dos parâmetros elétricos do solo e vegetação em uma região suburbana típica da Amazônia, caracterizada por rodovias ou ruas que cortam densas áreas de floresta. Verificou-se [1] que a formulação do problema inverso através dos mínimos quadrados ponderados é considerada a forma

que leva mais rapidamente à convergência de resultados na maioria das técnicas de otimização usadas atualmente.

Para analisar o uso desta metodologia, foram realizadas campanhas de medições da intensidade do campo elétrico gerado por transmissores operando em frequências típicas de comunicações móveis nas cidades de Benfica, Marituba e Barcarena no Estado do Pará e a utilização do modelo matemático baseado no formalismo das equações parabólicas para obtenção dos valores da intensidade do campo elétrico, os quais, segundo SOUZA, et.al. [2], foram bem mais próximos dos valores obtidos nas medições se comparados com os obtidos pelos demais modelos testados naquela região. Além disso, SOUZA, et.al. [2] também percebeu que o modelo de equações parabólicas apresentava menor esforço computacional.

Por fim, para atender os sistemas de comunicações de principal interesse deste trabalho, é necessário realizar novas campanhas de medições para as faixas de UHF usadas em transmissão da TV Digital, bem como medições nas faixas usadas em ondas médias que serão as utilizadas pelo futuro sistema de radiodifusão sonora brasileiro conforme determinação da ANATEL, sendo também realizadas simulações computacionais para obtenção dos valores das intensidades do campo elétrico nestas novas faixas de frequência usando as equações parabólicas.

1.3- OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é propor um método de inversão usando a técnica dos mínimos quadrados ponderados para a obtenção dos parâmetros elétricos equivalentes do solo e da vegetação da região amazônica associado a um modelo baseado no formalismo das equações parabólicas [2] para calcular a intensidade de campo elétrico e em medições de campo. Para isso, um laboratório móvel foi montado para realização das medições no ambiente selecionado. Além do mais, medidas de campo oriundas de outras regiões do país, obtidas por pesquisadores do INCT-CSF serão usadas para testar o método. Todos esses resultados serão analisados e comparados com alguns dos principais modelos de previsão de perda de propagação de rádio apresentados na literatura e com o modelo baseado no formalismo das equações parabólicas.

1.4- TRABALHOS RELACIONADOS

Desde os anos 60 são apresentados na literatura métodos ou técnicas para calcular ou medir os parâmetros elétricos da vegetação e do solo de áreas florestais, sendo alguns deles apresentados neste parágrafo.

1 – Técnica do capacitor de placas paralelas:

Desenvolvida em 1966 por PARKER, et.al. [3], esta técnica considera a região florestal como um meio dielétrico, sendo assim, possível estimar os valores dos parâmetros elétricos da floresta colocando-se placas elétricas paralelas em seu interior. Contudo, devido às dificuldades em posicionar e localizar o capacitor dentro da floresta esta técnica tornou-se pouco eficiente em relação às demais.

2 – Técnica da cavidade ressonante:

Também apresentada no trabalho de PARKER, et.al. [3] em 1966, esta técnica consiste do uso de uma cavidade ressonante contendo amostras de vegetação para obtenção dos parâmetros elétricos da floresta. Pela observação das variações de um determinado fator de qualidade e sua respectiva frequência de ressonância era possível estimar as propriedades elétricas da vegetação. Porém, os resultados apresentados para as faixas de frequência HF e VHF não foram satisfatórios.

3 – Método do coeficiente de reflexão:

Apresentada por SHRANGER, et.al. [4] em 1967, esta técnica obtém os parâmetros elétricos da floresta através da determinação da onda estacionária na interface floresta e clareira e posterior observação da localização dos extremos e nulos obtidos, sendo bons resultados obtidos na faixa de VHF.

4 – Linha de transmissão aberta:

Em 1971, TAYLOR, et.al, [5] e PARKER, et.al. [6] utilizando uma linha de transmissão aberta dentro de uma floresta, obtiveram valores da permissividade da vegetação com a medição da impedância de entrada.

5 – Diagrama de irradiação:

Técnica implementada por BAKER, et.al. [7] e MUEHE, et.al. [8] em 1973, busca a determinação dos parâmetros elétricos da vegetação realizando comparações do diagrama de irradiação calculado com o obtido pelas medições no interior de uma floresta. Bons resultados foram obtidos nas faixas de HF, VHF e UHF.

6 – Sensoriamento remoto:

Concebida em 1975 por LOMAX, et.al. [9] e ULABY, et.al. [10], esta técnica de identificação de plantações foi utilizada para obtenção de sinais de radar multi-frequências associados a outras técnicas como radiometria para estimar valores dos parâmetros elétricos da floresta.

7 – Método do gradiente:

Em 1985, CAVALCANTE, et.al. [11] desenvolveu uma técnica que consistia na variação da combinação linear dos parâmetros condutividade e permissividade elétrica e posterior busca dos valores dos mínimos de uma função erro, a qual representava a comparação entre as medições da intensidade do campo elétrico com os valores obtidos por um modelo teórico que variava com a frequência e a distância. O processo parava quando a função erro atingia um valor de tolerância predefinido.

Os resultados obtidos para os parâmetros condutividade elétrica e permissividade elétrica com o método do gradiente foram aproximadamente iguais para as polarizações horizontal e vertical.

Para o caso da determinação dos parâmetros elétricos do solo, a literatura destaca duas formas de proceder. Na primeira, é feito o estudo dos parâmetros elétricos através da análise de amostras do terreno, enquanto que na segunda, são usadas as informações das ondas eletromagnéticas propagantes. Abaixo são apresentados alguns destes métodos.

1 – Método da inclinação da onda de superfície:

Este método, proposto em 1973 [12], é baseado no aparecimento de uma componente radial do campo elétrico quando o mecanismo de propagação envolvido é constituído por uma onda de superfície, onde a determinação dos parâmetros do solo é obtida pela medição da relação entre o eixo maior de uma onda polarizada elipticamente e a inclinação da mesma.

2 – Método da atenuação da onda de superfície:

Neste método, proposto em 1972, é feita a medição do valor da intensidade do campo elétrico referente à onda de superfície em alguns pontos para diferentes percursos dentro da região estudada. Sendo possível construir curvas de campo elétrico versus distância para os percursos e, assim, comparar estas curvas com as curvas teóricas de intensidade campo elétrico versus distância fornecidas pelo FCC [13]. Com isso, é possível deduzir os valores da condutividade elétrica do solo para diferentes valores de frequência e constantes dielétricas.

Este método não é recomendado em situações que a condutividade elétrica varia com o terreno, pois as curvas fornecidas pelo FCC consideram a condutividade elétrica uniforme.

3 – Método do gradiente:

O método do gradiente, inicialmente proposto em 1985 para estimar as propriedades elétricas da floresta, foi usado em associação ao método da atenuação da onda de superfície para permitir a determinação dos parâmetros elétricos do solo. Para isso, foi desenvolvido um programa em linguagem FORTRAN que executava o método do gradiente de forma mais eficiente.

Também foi utilizado o método de Vander Pol e Bremmer [14],[15] para o cálculo do campo elétrico devido à onda de superfície com correção para a altura da antena transmissora e potência de irradiação.

4 –Predição da condutividade elétrica do solo usando o erro médio quadrático

No final da década de 90, RODRIGUES, et.al. [16] usando o método da Atenuação da Onda de Superfície demonstrou que havia a necessidade de uma nova versão para o *World Atlas of Ground Conductivities* da Recomendação ITU-R P.832-2 [17]. Esta recomendação estabelecia valores para a condutividade elétrica do solo através da observação de uma série de mapas obtidos por medições de campo para as faixas de frequência de ondas médias.

Motivado pelos resultados obtidos por RODRIGUES, et.al. [16], LIMA, et.al. [18] propôs em 2006 uma metodologia baseada no erro médio quadrático que estimava valores para os parâmetros elétricos do solo usando o modelo de Terra Esférica e os resultados obtidos por uma campanha de medições realizada em seis rotas radiais que partiam da cidade de Brasília-DF, na região central do Brasil. Sendo que este método consistia na comparação entre os valores das medidas de atenuação com os resultados encontrados usando o modelo de Terra Esférica.

Para o cálculo do valor da atenuação foi usada a expressão:

$$A[dB] = 142 + 20 \log f - E \quad (1.1)$$

Onde f é frequência do sinal em MHz e E representa os valores de intensidade de campo elétrico em dB μ .

Para a determinação do erro médio quadrático entre os valores obtidos nas medições e os valores da resposta teórica, usou-se:

$$REMQ = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - m_i)^2} \quad (1.2)$$

Onde p_i representa o i -ésimo valor teórico, m_i a correspondente i -ésima medida e N o número de pontos.

Com os valores obtidos na equação 1.2, foi possível criar uma curva contendo os valores do erro médio quadrático versus condutividade elétrica. Na Figura 1.1, é mostrada esta curva para a Rota 01. Onde o valor da permissividade relativa foi considerado constante e igual a 15.

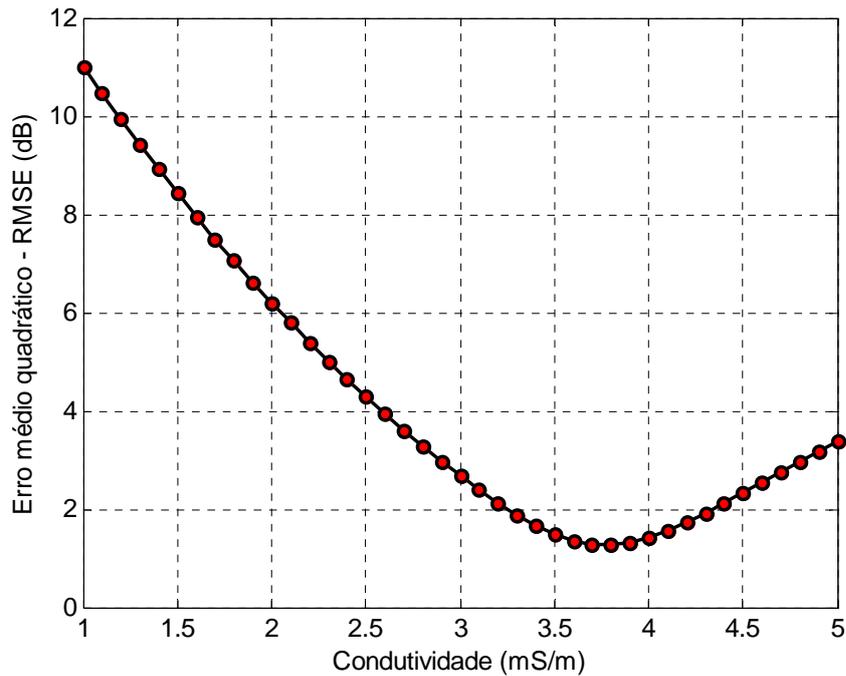


Figura 1.1 – curva do erro medido quadrático versus condutividade para a Rota 01 [18].

Pela simples observação da Figura 1.1 é possível encontrar o valor da condutividade elétrica que produz o menor erro médio quadrático, ou seja, o valor mais próximo do real para aquela rota.

Este procedimento foi repetido para as outras cinco rotas, sendo encontrados valores ótimos para a condutividade elétrica do solo.

Foram também construídas curvas de intensidade de campo elétrico versus distância considerando os valores 4, 15 e 25 para a permissividade elétrica na Rota 01, sendo neste caso atribuído um valor para a condutividade elétrica de 3,8 mS/m. A Figura 1.2 mostra estas curvas.

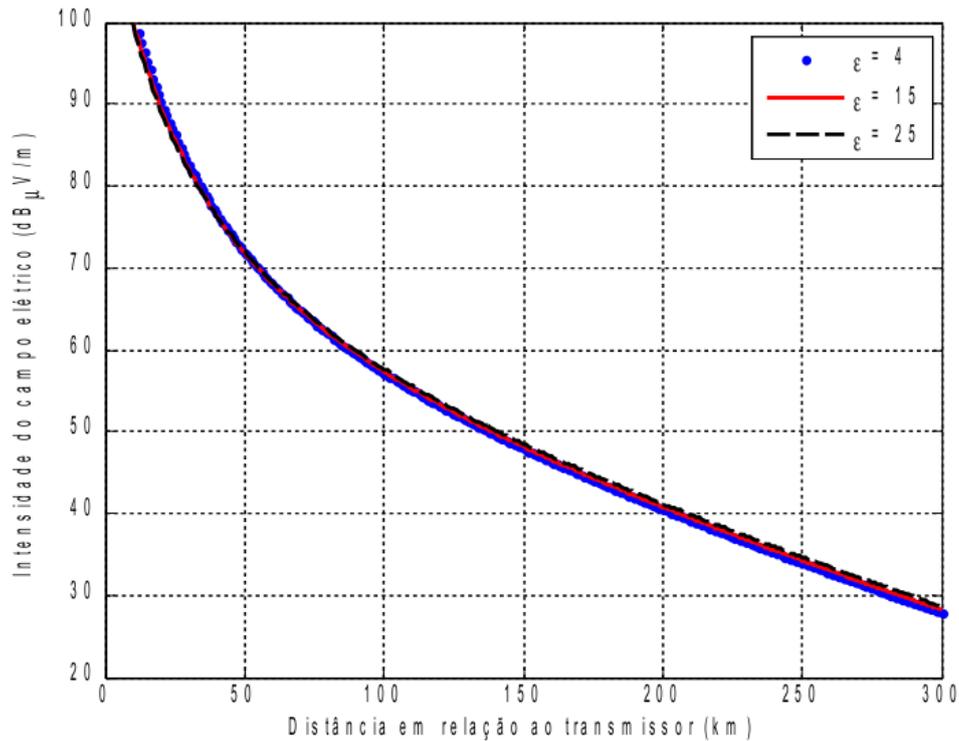


Figura 1.2 – Intensidade de campo elétrico versus distâncias para a Rota 01 [18].

Na Figura 1.2, observa-se que as curvas representando a intensidade de campo elétrico variando com a distância são praticamente iguais para os três valores de permissividade elétrica considerados.

Através da análise cuidadosa das curvas representativas do erro médio quadrático versus distância nas seis rotas, verificou-se que valores estimados da condutividade elétrica por este método eram superiores aos obtidos pela Recomendação ITU-R P.832-2 para a região central do Brasil. Esta informação mostrou que a área de cobertura de estações de radiodifusão sonora operando em Ondas médias daquela região poderia ser maior que a aprovada pela ANATEL.

5 – Predição da condutividade elétrica do solo usando redes neurais

Em 2008, MONTEIRO, et.al. [19], usando uma metodologia baseada no estudo de redes neurais estimou valores das condutividades elétricas do solo para as mesmas seis rotas analisadas na região central do Brasil. Sendo que esta metodologia consistia na implementação de uma rede neural inteligente que realizava a comparação dos valores obtidos nas medições de campo com os valores calculados através do modelo de Terra Esférica.

A aplicação do método para as seis rotas estudadas na região central do Brasil pode ser descrita da seguinte forma:

- Inicialmente, deve-se criar uma curva dos valores medidos de intensidade de campo elétrico versus distância para cada uma das rotas. Depois, escolhe-se uma rota para ser a rota de referência.

- A distância da rota escolhida como rota de referência será usada para a determinação do campo elétrico para diferentes valores de condutividade do solo.

- Estes valores de intensidade de campo elétrico versus distância para a rota de referência entrariam como os parâmetros de entrada da rede neural, sendo os diferentes valores de condutividade elétrica do solo considerados como os parâmetros desejáveis da rede.

- Após esta etapa, os valores de intensidade de campo elétrico versus distância para cada uma das seis rotas serão usados para ser o padrão de teste da rede neural.

Com a aplicação do método baseado em redes neurais, verificou-se que os valores de condutividade elétrica estimados para o solo das seis rotas estudadas foram superiores aos encontrados usando a Recomendação ITU-R P.832-2 e muito próximos aos encontrados usando a metodologia do erro médio quadrático apresentada por LIMA, et.al. [18].

6 – Predição dos parâmetros elétricos do solo usando algoritmos genéticos (AG)

Em 2010, CALIXTO, et.al. [20], foi apresentada uma metodologia de otimização baseada no uso de algoritmos genéticos (AG) para obtenção dos parâmetros elétricos do solo, o qual foi representado por uma estrutura de multicamadas. Neste método, construiu-se uma curva da resistividade aparente do solo versus distância obtida a partir de campanhas de medições e, posterior comparação com a curva de resistividade aparente do solo obtida através da metodologia baseada em algoritmos genéticos. Assim, era possível estimar o menor erro produzido, e consequente obtenção dos parâmetros elétricos ótimos.

7 – Estudo da dependência da permissividade relativa do solo e da resistividade do solo com a frequência.

Em 2012, VISACRO, et.al. [21], apresentou um método baseado em medições para prever a dependência da resistividade do solo e da permissividade relativa a com frequência. Para isso, foram realizados estudos para vários tipos de solos com resistividades entre 50 e 9.100 $\Omega.m$, onde se verificou uma grande variação destes parâmetros elétricos com a frequência na faixa de 100 a 4 MHz.

1.5- CONTRIBUIÇÕES DA TESE

A metodologia proposta neste trabalho irá contribuir para:

- Criar uma ferramenta para estimativas das propriedades elétricas equivalentes dos solos de outras regiões do país e gerar um mapa atualizado de condutividade dessas regiões e sua possível extensão a regiões similares que oriente os novos projetos de rádio enlaces tanto em ondas médias com em UHF.

- Determinação do campo elétrico recebido em regiões florestais, usando o modelo de equações parabólicas, inicialmente para as frequências de comunicações móveis de 900 MHz e 1800 MHz e posterior comparação com os valores das medições de campo realizadas em cidades típicas amazônicas.

- O estudo investigativo dos parâmetros elétricos equivalentes da vegetação e solo de florestas através da metodologia de inversão proposta considerando as novas tecnologias de radiodifusão sonora digital e TV Digital e, desta forma realizar a caracterização do canal de propagação para as faixas de ondas médias e UHF na região amazônica.

- O uso do formalismo das equações parabólicas para a determinação da intensidade do campo elétrico transmitido pelas novas estações de rádio digital e TV Digital com maior precisão.

1.6- ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O capítulo 2 descreve a metodologia de inversão usando os mínimos quadrados ponderados apresentada neste trabalho para a determinação dos parâmetros elétricos do solo e da floresta.

No capítulo 3 são apresentados alguns modelos presentes na literatura destinados à determinação da perda de propagação usados em ambientes florestais. Sendo também apresentado o modelo baseado nas equações parabólicas utilizado neste trabalho para o cálculo do valor da intensidade do campo elétrico para uma onda que se propagava através do ambiente suburbano de três municípios da região amazônica: Benfica, Marituba e Barcarena.

O capítulo 4 apresenta uma descrição do cenário das medições em Benfica, Marituba e Barcarena, a metodologia teórica e uma análise quantitativa dos resultados, onde são destacados os valores dos parâmetros condutividade elétrica e permissividade relativa obtidos pelo método de inversão para aquela região e sua respectiva comparação com os valores presentes na literatura, enfatizando a importância de ser realizada uma atualização dos padrões atualmente usados. Por fim, são apresentados os resultados da aplicação do método de inversão em outra região do Brasil.

O capítulo 5 apresenta as considerações e conclusões feitas após o uso da nova técnica de obtenção dos parâmetros elétricos da vegetação e solo no ambiente florestal amazônico considerando sistemas de comunicações móveis operando nas frequências de 900 MHz e 1800 MHz. Além disso, também foram apresentados os resultados obtidos usando o método de inversão aqui proposto para outra região do Brasil. Finalizando o capítulo 5, são apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

MÉTODO DE INVERSÃO USANDO A MINIMIZAÇÃO DOS MÍNIMOS QUADRADOS PONDERADOS

2.1—INTRODUÇÃO

Quando se deseja determinar o comportamento de um sistema através de modelamento matemático, é necessário o conhecimento total dos parâmetros envolvidos, das informações na entrada do sistema e de algumas condições de contorno. Contudo, se alguns destes parâmetros não são conhecidos ou são imprecisos, será necessário considerar, primeiramente, a situação de um problema inverso, onde informações, a priori, sobre a resposta na saída do sistema estarão disponíveis. Então, passa-se para a resolução do problema direto.

Através de ensaios experimentais ou campanhas de medições é possível encontrar os parâmetros desconhecidos de um sistema usando a solução do problema inverso, no qual se procura determinar um vetor de parâmetros desconhecidos que minimize a diferença entre os valores medidos e os valores obtidos através da resposta do modelo matemático que descreva o sistema. Esta diferença é representada por uma função conhecida por função objetivo ou função custo, sendo que sua minimização corresponde a otimização dos referidos parâmetros.

Neste trabalho foi escolhida a função objetivo baseada nos mínimos quadrados ponderados por ser considerada a forma que leva mais rapidamente à convergência na maioria das técnicas de otimização usadas atualmente.

2.2— FUNÇÃO OBJETIVO:

Em um problema de otimização, a função objetivo representa o critério de desempenho cujo mínimo se deseja encontrar. Sua representação baseada nos mínimos quadrados ponderados é dada por [22]:

$$C(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \left[\mu \left\{ \left\| \mathbb{W}_d \cdot \mathbf{z}(\mathbf{x}) \right\|^2 - X^2 \right\} + \left\| \mathbb{W}_x \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}_p) \right\|^2 \right] \quad (2.1)$$

onde o vetor de resíduos $\mathbf{z}(\mathbf{x})$ é definido como um vetor contendo M elementos representando o j -ésimo erro existente entre a j -ésima medida m_j realizada e a correspondente j -ésima representação simulada pelo modelo de previsão S_j . Sua representação normalizada tem a seguinte equação:

$$\bar{\mathbf{e}}(\bar{\mathbf{x}}) = \begin{bmatrix} e_1(\bar{\mathbf{x}}) \\ \vdots \\ e_M(\bar{\mathbf{x}}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1(\bar{\mathbf{x}}) - m_1 \\ \vdots \\ S_M(\bar{\mathbf{x}}) - m_M \end{bmatrix} = \bar{\mathbf{S}}(\bar{\mathbf{x}}) - \bar{\mathbf{m}}, \quad (2.2)$$

Em (2.1), o vetor $\bar{\mathbf{x}}$ representa o vetor dos parâmetros do modelo, o μ é conhecido como multiplicador de Lagrange e funciona como um fator de regularização. O parâmetro X serve como uma estimativa a priori do ruído presente nos dados. O termo $\bar{\mathbf{W}}_d$ é o inverso da matriz de covariância dos dados, descrevendo tanto a variância representada pelo peso de cada medida realizada m_j como a correlação estimada existente entre os erros. O termo $\bar{\mathbf{W}}_x$ é o inverso da matriz de covariância do modelo, sendo fornecida como informação a priori para representar a importância de cada elemento \mathbf{x} no vetor de resíduos.

O segundo termo da função objetivo é conhecido como termo de regularização, e representa as informações a priori sobre o modelo de previsão \mathbf{x} , sendo responsável pela eliminação das ampliações dos erros nos parâmetros estimados devido a ruídos presentes nas medições.

2.3—MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO

Vários são os métodos ou técnicas de otimização utilizados na literatura para a minimização da função objetivo e determinação dos parâmetros de modelos constitutivos, entre eles, pode-se citar os métodos baseados em algoritmos genéticos ou evolucionários e os métodos baseados em programação matemática [23].

Os métodos baseados em algoritmos genéticos realizam a otimização através dos conceitos de evolução das espécies, onde determinados indivíduos de uma população são selecionados para gerar os indivíduos da próxima geração. Este processo é recursivo, onde as novas gerações serão formadas através da combinação ou permutação dos indivíduos selecionados. Com isso, é realizada a busca pelo mínimo da função objetivo.

Para os métodos de programação matemática se procura calcular o gradiente da função objetivo para o conjunto de parâmetros através de um processo iterativo. Para isso, inicialmente, é necessário ser estabelecido um conjunto de parâmetros iniciais adequados à realidade do sistema.

Neste capítulo serão estudados os métodos de programação matemática de Newton, Newton Modificado, Gauss-Newton e Máxima Descida. Estes são considerados métodos de busca multidimensional, onde é realizada a busca iterativa em uma determinada direção para encontrar um vetor de parâmetros otimizado. Também será visto aqui o método de Busca Unidimensional, conhecido como busca Linear, no qual se procura otimizar o comprimento do passo na direção de busca.

2.3.1 - Método de Newton:

Utilizado para solucionar sistemas de equações não lineares, o método de Newton é um modelo quadrático da função objetivo, cuja representação através dos três primeiros termos da expansão em série de Taylor em torno da k -ésima iteração ($\bar{\mathbf{x}}_k$) é dado por:

$$C(\bar{\mathbf{x}}_k + \bar{\mathbf{p}}_k) \approx C(\bar{\mathbf{x}}_k) + \bar{\mathbf{g}}^T(\bar{\mathbf{x}}_k) \cdot \bar{\mathbf{p}}_k + \frac{1}{2} \bar{\mathbf{p}}_k^T \cdot \bar{\mathbf{G}}(\bar{\mathbf{x}}_k) \cdot \bar{\mathbf{p}}_k \quad (2.3)$$

onde o passo em $\bar{\mathbf{x}}_k$ na direção do mínimo da função objetivo $C(\bar{\mathbf{x}})$ é:

$$\bar{\mathbf{p}}_k = \bar{\mathbf{x}}_{k+1} - \bar{\mathbf{x}}_k$$

e $\bar{\mathbf{g}}(\bar{\mathbf{x}}) = \nabla C(\bar{\mathbf{x}})$ é o vetor gradiente da função objetivo e definido como:

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{g}}(\bar{\mathbf{x}}) = \nabla C(\bar{\mathbf{x}}) &= \left[g_n \equiv \frac{\partial C}{\partial x_n}, \quad n = 1, 2, 3, \dots, N \right] \\ &= \mu \mathbf{J}^T(\bar{\mathbf{x}}) \cdot \bar{\mathbf{W}}_a^T \cdot \bar{\mathbf{W}}_a \cdot \bar{\mathbf{e}}(\bar{\mathbf{x}}) + \bar{\mathbf{W}}_x^T \cdot \bar{\mathbf{W}}_x \cdot (\bar{\mathbf{x}} - \bar{\mathbf{x}}_p), \end{aligned} \quad (2.4)$$

onde $\mathbf{J}(\bar{\mathbf{x}})$ é a matriz Jacobiana de ordem $M \times N$ que é dada por:

$$\mathbf{J}(\bar{\mathbf{x}}) = \left[J_{mn} \equiv \frac{\partial e_m}{\partial x_n}, \quad m = 1, 2, 3, \dots, M; \quad n = 1, 2, 3, \dots, N \right] \quad (2.5)$$

e a $\bar{\mathbf{G}}(\bar{\mathbf{x}}) = \nabla \nabla C(\bar{\mathbf{x}})$ é a Hessiana da função objetivo $C(\bar{\mathbf{x}})$ dada por:

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{G}}(\bar{\mathbf{x}}) = \nabla \nabla C(\bar{\mathbf{x}}) &= \left[G_{nm} = \frac{\partial^2 C}{\partial x_n \partial x_m}, \quad n, m = 1, 2, 3, \dots, N \right] \\ &= \bar{\mathbf{W}}_x^T \cdot \bar{\mathbf{W}}_x + \mu \left[\mathbf{J}^T(\bar{\mathbf{x}}) \cdot \bar{\mathbf{W}}_a^T \cdot \bar{\mathbf{W}}_a \cdot \mathbf{J}(\bar{\mathbf{x}}) + \bar{\mathbf{Q}}(\bar{\mathbf{x}}) \right] \end{aligned} \quad (2.6)$$

O termo $\bar{\mathbf{Q}}(\bar{\mathbf{x}})$ representa as informações de segunda ordem da função objetivo $C(\bar{\mathbf{x}})$, e é dado por:

$$\bar{\mathbf{Q}}(\bar{\mathbf{x}}) = \sum_{m=1}^M f_m(\bar{\mathbf{x}}) \bar{\mathbf{P}}_m^T(\bar{\mathbf{x}}) \quad (2.7)$$

sendo f_m o m -ésimo elemento do vetor ponderado de resíduos e

$$\bar{\mathbf{P}}_m^T(\bar{\mathbf{x}}) = \nabla \nabla f_m(\bar{\mathbf{x}}) = \left[\frac{\partial^2 f_m}{\partial x_l \partial x_j}, \quad l, j = 1, 2, 3, \dots, N \right] \quad (2.8)$$

O mínimo da função objetivo é alcançado se o passo $\bar{\mathbf{p}}_k$ for o mínimo da função abaixo:

$$\mathcal{O}(\bar{\mathbf{p}}) = \bar{\mathbf{g}}^T(\bar{\mathbf{x}}_k) \cdot \bar{\mathbf{p}} + \frac{1}{2} \bar{\mathbf{p}}^T \cdot \bar{\mathbf{G}}(\bar{\mathbf{x}}_k) \cdot \bar{\mathbf{p}} \quad (2.9)$$

Fazendo:

$$\nabla \mathcal{C}(\bar{\mathbf{p}}_o) = \bar{\mathbf{G}} \cdot \bar{\mathbf{p}}_o + \bar{\mathbf{g}} = \mathbf{0} \quad (2.10)$$

E resolvendo a equação 2.10, encontra-se um ponto estacionário da função objetivo, ou seja, um ponto de mínimo, máximo ou ponto de sela em $\bar{\mathbf{p}}_o$. Assim, este ponto estacionário é a solução para o seguinte conjunto de equações lineares:

$$\bar{\mathbf{G}} \cdot \bar{\mathbf{p}}_o = -\bar{\mathbf{g}} \quad (2.11)$$

Há duas possibilidades para resolução da equação 2.11. A primeira ocorre quando $\bar{\mathbf{G}}$ for singular. Neste caso, se $\bar{\mathbf{g}}$ não puder ser expresso como uma combinação linear das colunas de $\bar{\mathbf{G}}$, então o sistema de equações acima é incompatível e não tem solução, portanto, o ponto estacionário não existe. Por outro lado, se o vetor $\bar{\mathbf{g}}$ puder ser expresso como uma combinação linear das colunas de $\bar{\mathbf{G}}$, então o sistema de equações é compatível e tem mais de uma solução.

Agora, se $\bar{\mathbf{G}}$ não for singular, então o sistema de equações dado em 2.11 terá uma única solução dada por:

$$\bar{\mathbf{p}}_o = -\bar{\mathbf{G}}^{-1} \cdot \bar{\mathbf{g}} = -\sum_{j=1}^N \frac{1}{\lambda_j} (\bar{\mathbf{v}}_j^T \cdot \bar{\mathbf{g}}) \bar{\mathbf{v}}_j \quad (2.12)$$

cuja norma é dada por:

$$\|\bar{\mathbf{p}}_o\| \equiv (\bar{\mathbf{p}}_o^T \cdot \bar{\mathbf{p}}_o)^{1/2} = \left[\sum_{j=1}^N \frac{1}{\lambda_j^2} (\bar{\mathbf{v}}_j^T \cdot \bar{\mathbf{g}})^2 \right]^{1/2} \quad (2.13)$$

Onde λ_j e $\bar{\mathbf{v}}_j$ são os correspondentes autovalores e auto vetores ortonormais da matriz Hessiana $\bar{\mathbf{G}}$ e o ponto \mathbf{p}_o será um ponto de máximo ou de mínimo de $\bar{\mathbf{G}}$.

Se $\bar{\mathbf{G}}(\bar{\mathbf{x}}_k)$ for uma matriz positiva definida, então a função objetivo terá um único ponto estacionário e a direção $\bar{\mathbf{p}}_o$ será uma direção de descida, uma vez que:

$$\mathcal{C}(\bar{\mathbf{x}}_k + \bar{\mathbf{p}}_o) - \mathcal{C}(\bar{\mathbf{x}}_k) \approx -\frac{1}{2} \sum_{j=1}^N \frac{1}{\lambda_j} (\bar{\mathbf{v}}_j^T \cdot \bar{\mathbf{g}})^2 < 0 \quad (2.14)$$

Por outro lado, se $\bar{\mathbf{G}}$ for indefinida, então o modelo quadrático terá um único ponto estacionário que não necessariamente precisa representar uma direção de descida, uma vez que $\mathcal{C}(\bar{\mathbf{x}}_k + \bar{\mathbf{p}}_o) - \mathcal{C}(\bar{\mathbf{x}}_k)$ pode ser positivo.

2.3.2 - Método Modificado de Newton

Como visto no item anterior, quando a matriz Hessiana $\mathbf{G}(\bar{\mathbf{x}}_k)$ for indefinida, não será possível precisar se a direção de busca \mathbf{p}_o é de descida ou não. Neste caso, o método modificado de Newton pode ser usado, onde a matriz $\mathbf{G}(\bar{\mathbf{x}}_k)$ será substituída por uma matriz definida positivamente $\mathbf{K}(\bar{\mathbf{x}}_k)$. Assim, a direção de busca será dada através da resolução da equação abaixo:

$$\mathbf{K} \cdot \bar{\mathbf{p}}_o = -\bar{\mathbf{g}} \quad (2.15)$$

E a direção de busca \mathbf{p}_o será dada por:

$$\bar{\mathbf{p}}_o = -\mathbf{K}^{-1} \cdot \bar{\mathbf{g}} = -\sum_{i=1}^N \frac{1}{|\lambda_i|} (\bar{\mathbf{v}}_i^T \cdot \bar{\mathbf{g}}) \bar{\mathbf{v}}_i \quad (2.16)$$

Esta direção é garantida ser de descida em $\bar{\mathbf{p}}_k = \bar{\mathbf{p}}_o$.

2.3.3 - Método de Gauss-Newton

Este método descarta a derivada de segunda ordem da equação 2.6, facilitando o cálculo da função Hessiana, a qual se reduz a equação abaixo:

$$\bar{\mathbf{G}}(\mathbf{x}) = \bar{\mathbf{W}}_x^T \cdot \bar{\mathbf{W}}_x + \mu \bar{\mathbf{J}}^T(\mathbf{x}) \cdot \bar{\mathbf{W}}_d^T \cdot \bar{\mathbf{W}}_d \cdot \bar{\mathbf{J}}_x \quad (2.17)$$

sendo $\bar{\mathbf{G}}(\mathbf{x})$ uma matriz semi definida positiva e a direção busca $\bar{\mathbf{p}}_k$ passa se chamada de direção busca de Gauss-Newton.

O método de Gauss-Newton possui uma melhor taxa de convergência se comparada com uma taxa linear, porem menor que a taxa quadrática do método de Newton.

2.3.4 - Método da Máxima Descida

Utilizado como forma de evitar o trabalho computacional de se inverter a matriz Hessiana \mathbf{G} , como ocorre nos métodos anteriormente citados, o método da Máxima Descida utiliza o negativo do gradiente da função objetivo como direção de busca, onde a direção oposta ao gradiente da função objetivo é considerada a direção de máximo decrescimento da mesma [24]. Assim a direção de busca fica:

$$\bar{\mathbf{p}}_k = -\gamma_k \bar{\mathbf{g}}(\bar{\mathbf{x}}_k) \equiv -\gamma_k \bar{\mathbf{g}}_k \quad (2.18)$$

onde $\bar{\mathbf{p}}_k$ é um passo de comprimento positivo.

2.3.5 - Método da busca unidimensional

Os métodos de Newton, Newton Modificado, Gauss-Newton e Máxima Descida são usados para encontrar a direção de descida que diminua a função objetivo, contudo o tamanho do passo tomado nesta direção pode não reduzir suficientemente a função objetivo. Neste caso, o Método de Busca Unidimensional, também conhecido por Busca Linear [24] é usado como um algoritmo que realizará uma busca por um comprimento de passo positivo v_k ao longo da direção de busca \bar{p}_k tal que produza uma iteração $\bar{x}_{k+1} = \bar{x}_k + v_k \bar{p}_k$, que diminua suficientemente a função objetivo.

2.4 - Terminação do processo de iteração

O processo de iteração irá parar quando uma das seguintes condições ocorrerem primeiro:

- 1) Quando o erro médio quadrático atingir um determinado valor η , definido a priori, a partir do conhecimento das estimativas de ruído ocorrido nos dados.

$$\left\{ \frac{1}{M} \|\bar{\varepsilon}\|^2 \right\}^{1/2} \leq \eta$$

- 2) Quando as diferenças entre duas sucessivas iterações dos parâmetros do modelo \mathbf{x} estão dentro de um fator de tolerância, tol:

$$|x_{j,k+1} - x_{j,k}| \leq \text{tol} \times |x_{j,k+1}|, \quad j = 1, 2, 3, \dots, N$$

- 3) O número de iterações exceder um máximo estabelecido pelo programador,
- 4) Quando a diferença entre a função objetivo em duas iterações sucessivas está dentro de um fator de tolerância definido a priori, tol , da função objetivo na atual iteração:

$$|C(\bar{x}_{k+1}) - C(\bar{x}_k)| \leq \text{tol} \times C(\bar{x}_{k+1})$$

2.5 – Abordagens bayesianas para a minimização dos mínimos quadrados ponderados

Uma abordagem da minimização dos mínimos quadrados ponderados através do estudo das variáveis aleatórias em processos estocásticos é feita nesta seção, onde um erro de medição definido por e_i representa a diferença entre cada valor de medida realizada m_i e a correspondente resposta simulada $S_i(\bar{x})$ pelo modelo \mathbf{x} [22]:

$$S(\bar{x}) - \bar{m} = \bar{\varepsilon} \quad (2.19)$$

Para esta situação, considera-se $\bar{\varepsilon}$ uma variável aleatória com distribuição Gaussiana com média zero. Neste caso, a função distribuição de probabilidade de $\bar{\varepsilon}$ será dada por

$$P(\bar{\varepsilon}) = P_\varepsilon \exp \left\{ -\frac{1}{2} \bar{\varepsilon}^T \cdot \bar{\Lambda}_\varepsilon^{-1} \cdot \bar{\varepsilon} \right\} \\ = P_\varepsilon \exp \left\{ \frac{1}{2} [\bar{m} \quad S(\bar{x})]^T \cdot \bar{\Lambda}_\varepsilon^{-1} \cdot [\bar{m} \quad S(\bar{x})] \right\}, \quad (2.20)$$

onde P_ε é uma constante de normalização e $\bar{\Lambda}_\varepsilon$ é a matriz de covariância do ruído.

A função densidade de probabilidade $P(e)$ pode também ser definida como função densidade de probabilidade condicional dos dados medidos sendo fornecido o modelo, podendo ser representada como:

$$P(\bar{\mathbf{m}}|\bar{\mathbf{x}}) = P_e \exp\left\{-\frac{1}{2}[\bar{\mathbf{m}} - \mathfrak{S}(\bar{\mathbf{x}})]^T \cdot \bar{\Lambda}_e^{-1} \cdot [\bar{\mathbf{m}} - \mathfrak{S}(\bar{\mathbf{x}})]\right\} \quad (2.21)$$

Esta forma é conhecida com função de verossimilhança $L(\bar{\mathbf{x}}|\bar{\mathbf{m}})$.

Podem-se estimar os parâmetros do modelo \mathbf{x} , maximizando a função distribuição de probabilidade dada pela equação 2.21; isso corresponde a minimizar o negativo de seu logaritmo, e fazendo $\bar{\Lambda}_e^{-1} = \bar{\mathbb{W}}_d^T \cdot \bar{\mathbb{W}}_d$, obtém-se a forma de estimação conhecida com estimativa de máxima verossimilhança dada por:

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{x}}_{ML} &= \arg \max_{\bar{\mathbf{x}}} \{L(\bar{\mathbf{x}}|\bar{\mathbf{m}})\} = \arg \max_{\bar{\mathbf{x}}} \{P(\bar{\mathbf{m}}|\bar{\mathbf{x}})\} \\ &= \arg \min_{\bar{\mathbf{x}}} \left\{ \frac{1}{2} [\mathfrak{S}(\bar{\mathbf{x}}) - \bar{\mathbf{m}}]^T \cdot \bar{\Lambda}_e^{-1} \cdot [\mathfrak{S}(\bar{\mathbf{x}}) - \bar{\mathbf{m}}] \right\} \end{aligned} \quad (2.22)$$

Em termos de bayesianas, pode-se também representar a função densidade de probabilidade conjunta $P(\bar{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{m}})$ que é dada por:

$$P(\bar{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{m}}) = P(\bar{\mathbf{m}})P(\bar{\mathbf{x}}|\bar{\mathbf{m}}) = P(\bar{\mathbf{x}})P(\bar{\mathbf{m}}|\bar{\mathbf{x}}) = P(\bar{\mathbf{x}})L(\bar{\mathbf{x}}|\bar{\mathbf{m}}) \quad (2.23)$$

E, assim, obtém-se a seguinte expressão para a densidade de probabilidade condicional do modelo \mathbf{x} :

$$P(\bar{\mathbf{x}}|\bar{\mathbf{m}}) = \frac{P(\bar{\mathbf{x}})L(\bar{\mathbf{x}}|\bar{\mathbf{m}})}{P(\bar{\mathbf{m}})} \quad (2.24)$$

A partir de 2.24, pode-se definir a máxima estimativa da probabilidade a priori como:

$$\bar{\mathbf{x}}_{MAP} = \arg \max_{\bar{\mathbf{x}}} \{P(\bar{\mathbf{x}}|\bar{\mathbf{m}})\} \quad (2.25)$$

Este resultado é equivalente a minimizar o negativo do logaritmo de $P(\bar{\mathbf{x}}|\bar{\mathbf{m}})$:

$$\bar{\mathbf{x}}_{MAP} = \arg \min_{\bar{\mathbf{x}}} \left\{ \frac{1}{2} [\mathfrak{S}(\bar{\mathbf{x}}) - \bar{\mathbf{m}}]^T \cdot \bar{\Lambda}_e^{-1} \cdot [\mathfrak{S}(\bar{\mathbf{x}}) - \bar{\mathbf{m}}] - \ln \left[\frac{P_e P(\bar{\mathbf{x}})}{P(\bar{\mathbf{m}})} \right] \right\} \quad (2.26)$$

Fazendo a suposição de que o modelo $\bar{\mathbf{x}}$ é uma variável aleatória com uma distribuição normal com média $\bar{\mathbf{x}}_p$ a função densidade de probabilidade $P(\bar{\mathbf{x}})$ pode ser escrita como:

$$P(\bar{\mathbf{x}}) = P_x \exp\left\{-\frac{1}{2}[\bar{\mathbf{x}} - \bar{\mathbf{x}}_p]^T \cdot \bar{\Lambda}_x^{-1} \cdot [\bar{\mathbf{x}} - \bar{\mathbf{x}}_p]\right\} \quad (2.27)$$

onde P_x é um termo de normalização e $\bar{\Lambda}_x$ é a matriz covariância do modelo. Neste caso, fazendo as devidas substituições $\bar{\mathbf{x}}_{MAP}$ será dado por:

$$\bar{x}_{MAP} = \arg \min_{\bar{x}} \frac{1}{2} \left\{ [\mathcal{S}(\bar{x}) - \bar{m}]^T \cdot \bar{\Lambda}_e^{-1} \cdot [\mathcal{S}(\bar{x}) - \bar{m}] + [\bar{x} - \bar{x}_p]^T \cdot \bar{\Lambda}_x^{-1} \cdot [\bar{x} - \bar{x}_p] \right\} \quad (2.28)$$

onde:

$$\bar{\Lambda}_e^{-1} = \bar{W}_e, \quad \bar{\Lambda}_x^{-1} = \bar{W}_x^T \cdot \bar{W}_x$$

A equação 2.28 é equivalente ao problema de Mínimos Quadrados Ponderados e, assim, pode-se escrever a função objetivo $\mathcal{C}(\bar{x}, \bar{m})$ como:

$$\mathcal{C}(\bar{x}, \bar{m}) = \frac{1}{2} \left\{ \mu [\mathcal{S}(\bar{x}) - \bar{m}]^T \cdot \bar{\Lambda}_e^{-1} \cdot [\mathcal{S}(\bar{x}) - \bar{m}] + [\bar{x} - \bar{x}_p]^T \cdot \bar{\Lambda}_x^{-1} \cdot [\bar{x} - \bar{x}_p] \right\} \quad (2.29)$$

Verificando a equação 2.29, nota-se a presença do fator de regularização μ , que foi introduzido devido a sua importância mencionada anteriormente.

2.6 – Conclusão

Este capítulo apresentou o método de inversão baseado nos Mínimos Quadrados Ponderados e as técnicas de otimização mais conhecidas na literatura para a obtenção do mínimo da função objetivo que representava a diferença entre os valores medidos e os valores obtidos através da resposta de um modelo matemático. Foi também apresentada uma abordagem em termos de bayesianas para a minimização dos mínimos quadrados ponderados.

No próximo capítulo serão apresentados os principais modelos usados para a predição da perda de propagação em floresta, dentre eles destacaremos o modelo baseado no formalismo das equações parabólicas que foi utilizado neste trabalho por apresentar resultados bem mais próximos dos obtidos nas campanhas de medição.

CAPÍTULO 3

MODELOS DE PREDIÇÃO DA PERDA DE PROPAGAÇÃO PARA FLORESTA

3.1 – INTRODUÇÃO

No projeto de um sistema de rádio propagação torna-se necessário o desenvolvimento de algum método ou modelo destinado a predição das perdas de propagação eletromagnética ocorridas na propagação do sinal, onde cada um destes modelos caracteriza um determinado ambiente com suas particularidades.

Este capítulo apresenta alguns dos principais modelos destinados ao estudo da radio propagação em ambientes florestais.

Os modelos usados para floresta começaram a ser implementados ainda nas décadas de 60 e 70 como os modelos de Burrows, de J.Wait, de T.Tamir, de SachseWyatt, de Rosenbaum e Bowles, do Percurso Misto e no início dos nos anos 80, o modelo quatro camadas de Cavalcante, todos eles voltados para a propagação na faixa de VHF. Nos anos 90, L.W.Li, utilizou o modelo de Cavalcante para a faixa de UHF, sendo que em 2004, ele o reutilizou considerando a floresta um meio anisotrópico.

No final da década de 90 começaram a ser desenvolvidos modelos de previsão de intensidade de campo elétrico para a região amazônica dentro do Estado do Pará para a faixa de 800 a 900 MHz considerando sistemas de comunicações móveis. Dentre estes, tem-se o método multiraios [25] destinado ao estudo das perdas de percurso ocorridas na propagação rádio móvel quando se considera um ambiente formado por uma grande área florestal, como é o caso da região amazônica, onde a maioria das estradas, rodovias ou rios cortam florestas.

Mais recentemente, foram desenvolvidos vários trabalhos usando o modelamento baseado no formalismo das equações parabólicas para o cálculo da intensidade do campo elétrico em ambiente misto florestal com a presença de pequenas edificações, e ruas cortadas por vasta vegetação típica amazônica, sendo este o modelo usado neste trabalho por apresentar os resultados teóricos que mais se aproximaram dos resultados obtidos pela campanha de medições ocorrida nos municípios de Benfica, Barcarena e Marituba [2].

3.2 – MODELO DE BURROWS

Este modelo foi desenvolvido para propagações em floresta na faixa de VHF, usado tanto para polarização vertical como polarização horizontal, e considerando o efeito das alturas das antenas transmissoras e receptoras através de sua expressão de Rádio-Ganho dada por [26,27]:

$$\frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{2 \cdot h_t \cdot h_r}{2 \cdot d^2} \right)^2 \left(\frac{R_o}{R} \right)^2 F_s^2 F_f^2 \quad (3.1)$$

onde as potências transmitidas e recebidas são dadas por P_t e P_r , as alturas das antenas transmissora e receptora h_t e h_r , a distância d entre transmissor e receptor, R_o e R são, respectivamente, a resistência de irradiação de um dipolo no espaço livre e a resistência total da antena considerando a vegetação, F_f é o fator que considera os efeitos da floresta e F_s é o fator de sombreamento devido a curvatura da terra.

3.3 – MODELO DE J. WAIT

Em 1967, Wait [28] propôs um modelo para a faixa de VHF que considerava o cenário representado por um dipolo irradiante situado dentro de uma placa dissipativa em um semi-espaço condutor, onde verificou que o campo elétrico resultante variava com inverso do quadrado da distância entre transmissor e receptor, e que havia o aparecimento de uma componente de onda lateral que variava com a altura da placa. Foi considerada também a situação do dipolo ficar fora da placa dissipativa.

3.4 – MODELO DE T. TAMIR

Este modelo [29] considerava o valor da intensidade do campo elétrico produzido pela propagação em uma floresta composto pelas contribuições devido à propagação na ionosfera, propagação dentro da floresta e na fronteira ar-floresta através de uma onda lateral. A faixa de frequência era de 1 a 100 MHz e não se considerava o efeito da terra. A geometria do modelo é mostrada na figura 2.1:

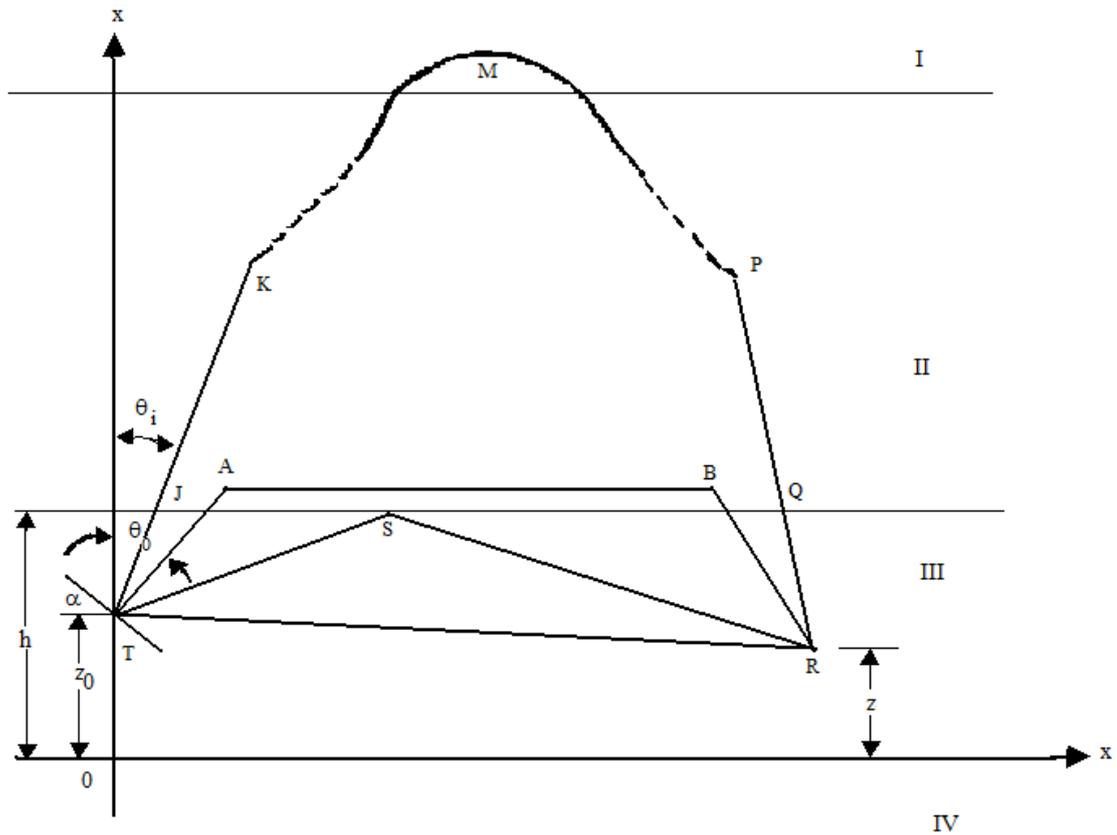


Figura 3.1 – Geometria para o modelo de Tamir

Na Figura 3.1, Z_0 representa a altura do transmissor situado dentro da floresta representada por uma placa dissipativa de altura h , sendo o transmissor um dipolo inclinado α em relação ao eixo x .

A floresta tem um índice de refração n dado por [29]:

$$n^2 = \epsilon_f - j60\sigma_f\lambda_0 \quad (3.2)$$

A expressão para a componente do campo elétrico devido a propagação dentro da floresta é dada por:

$$E^f = 30I_1 \left[f_d \frac{e^{-jK_0 n r_d}}{r_d} - f_r \frac{e^{-jK_0 n r_r}}{r_r} \right] \quad (3.3)$$

onde I_1 é o momento do dipolo irradiante, R_d e R_r são as distâncias representadas pelos segmentos TR e TRS , f_d e f_r são funções da geometria, e $K_0 = 2\pi/\lambda$ é a constante de propagação.

Para o mecanismo onda ionosférica, as expressões para campo recebido em R são:

$$E_z^i = E_y \sin \theta_i \cdot \sin \alpha \quad (3.4)$$

$$E_\rho^i = E_y \cos \theta_i \cos \theta \cos \alpha \quad (3.5)$$

$$E_\theta^i = -E_y \cos \theta_i \sin \theta \cos \alpha \quad (3.6)$$

onde α e θ_i representam, respectivamente, o ângulo de inclinação do dipolo irradiante em relação ao eixo x e o ângulo de inclinação da onda ionosférica, sendo E_s dado por:

$$E_y = 15I_1 k_0 A_i \frac{e^{-jK_0 n S \cos \theta_i}}{R \sec \theta_i} \quad (3.7)$$

Onde $S = 2h - Z_0 - Z$ e A_i representam a perda devido à ionosfera.

Neste modelo a componente devido à onda lateral produzida pela difração é predominante em relação às outras, considerando a distância máxima igual 100 km. Contudo, se forem consideradas distâncias maiores que 100 km, a componente devido à propagação na ionosfera se torna predominante; somente para pequeníssimas distâncias a contribuição devido à propagação dentro da floresta através dos raios direto e refletido é considerada relevante.

A expressão para a contribuição devido à onda lateral é dada por:

$$E_{\rho}^L = 60I_1 \frac{e^{-jR \alpha (\rho + \sqrt{n^2 - 1} S)}}{\rho^2} \left[\cos \theta_i \cdot \cos \alpha + \frac{\sin \alpha}{\sqrt{\rho^2 - 1}} \right] \quad (3.8)$$

$$E_{\theta}^L = 60I_1 \frac{e^{-jR \alpha (\rho + \sqrt{n^2 - 1} S)}}{\rho^2} \frac{\sin \theta_i \cdot \cos \alpha}{\rho^2 - 1} \quad (3.9)$$

$$E_z^L = 60I_1 \frac{e^{-jR \alpha (\rho + \sqrt{n^2 - 1} S)}}{\rho^2} \left[\frac{\cos \theta_i \cos \alpha}{\sqrt{n^2 - 1}} + \frac{\sin \alpha}{n^2 - 1} \right] \quad (3.10)$$

3.5 – MODELO DE SACHS E WYATT

Este modelo foi idealizado para a faixa de frequência de 6 a 100 MHz, considera a floresta como uma placa homogênea dielétrica situada em uma terra plana, sendo o elemento irradiante um dipolo elétrico. Os resultados são obtidos através de métodos numéricos e analíticos, onde o mecanismo de propagação predominante e representado por uma onda de superfície semelhante ao modelo de Tamir.[30].

3.6 – MODELO DE T. TAMIR E D. DENCE

Diferentemente do modelo anterior de Tamir que desconsiderava os efeitos do terreno como contribuição na expressão perda de propagação, este modelo considera o caso de um dipolo elétrico irradiante estar colocado dentro de uma floresta dissipativa limitada por baixo por uma terra condutora de condutividade finita e em cima pelo ar. A expressão para a perda de propagação é calculada a uma dada distância dentro da floresta onde se situa um dipolo receptor. Para este caso,

não é considerada a contribuição devida à camada correspondente à ionosfera no cálculo da perda total.

Assim, a perda total no dipolo receptor é dada por [31]:

$$L = 10 \log \left(\frac{P_t}{P_r} \right) = L_o + L_s + L_i + L_r \quad (3.11)$$

Onde P_t e P_r são, respectivamente, as potências transmitida e recebida, L_o corresponde a perda devido a onda lateral quando o dipolo irradiante é colocado na interface ar-floresta, L_s a perda devido as trajetórias TA e BR representadas na Figura 3.1, L_i a perda produzida pela interferência causada pela presença do solo próximo a antena e L_r é a perda devido a impedância de entrada das antenas transmissoras e receptora. Sendo que, se forem consideradas antenas muito altas, somente os dois primeiros termos da equação acima serão considerados, caso contrário, se as antenas forem próximas do solo, as parcelas L_i e L_r serão consideradas no cálculo da perda total.

3.7 – MODELO DE ROSENBAUM E BOWLES

Utilizando uma modelagem estocástica, os autores consideram a floresta como uma placa dissipativa igual ao modelo de Tamir. Contudo, quando a frequência de transmissão ultrapassa os 100 MHz, caminhando em direção a faixas de UHF e banda L, os efeitos do espalhamento da onda na floresta são considerados através do estudo das variações aleatórias da permissividade dentro da floresta [32].

3.8 – MODELO DO PERCURSO MISTO

Este modelo idealizado por Tamir [33], considera a propagação das ondas eletromagnéticas em um percurso misto floresta-clareira. Ele definiu quatro configurações básicas distintas e suas respectivas expressões para o campo elétrico, considerando os diferentes mecanismos de propagação envolvidos.

Para o dipolo irradiante localizado dentro da floresta, as quatro configurações são:

- o receptor dentro a floresta
- o receptor na região acima da floresta
- o receptor na região acima da clareira
- o receptor dentro da clareira próximo ao seu solo.

Para todas estas configurações é determinada a perda total do percurso.

3.9 – MODELO DE G.P.S. CAVALCANTE

Modelo desenvolvido nos anos 80, baseado nas funções diádicas de Green [35], [36] e sua generalização para N-camadas[34]. Nele, o autor idealizou um cenário composto por um meio de propagação dividido em quatro camadas, sendo a floresta representada por duas camadas dielétricas condutoras: copa e o tronco das árvores; as outras duas camadas são a terra plana condutora e o ar. A geometria deste modelo é representada pela figura 3.2:

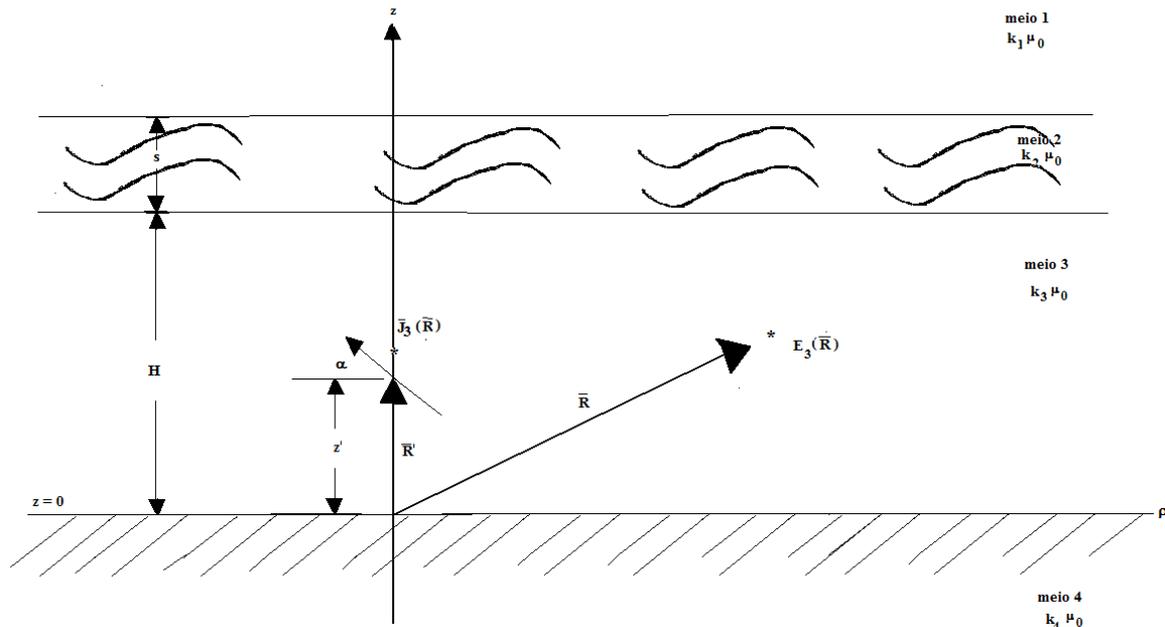


Figura 3.2 - Geometria para o modelo de quatro camadas

A Figura 3.2 ilustra a propagação das ondas eletromagnéticas através dos mecanismos de propagação representados pelos raios direto e refletido dentro da camada tronco das árvores e o raio que viajava paralelamente a copa das árvores que representava a onda lateral.

A onda lateral, por se propagar em meio que sofre somente atenuação com a distância, torna-se a componente predominante, por outro lado, as componentes representadas pela ótica geométrica dentro da floresta sofrem forte redução em seu valor com a distância devido ao fato de se considerar a floresta um meio com perdas.

3.10 – MODELO DE L. W. LI

Em 1990, LI [37] utilizando o modelo de CAVALCANTE, et.al. [34], fez um estudo da perda de propagação sofrida pelas ondas eletromagnéticas para sistemas que utilizavam a faixa de UHF e, em 2004 considerou uma das quatro camadas como um meio anisotrópico.

3.11 – MODELO DE MULTIRAIOS

Este modelo [25] é baseado no estudo da difração em gume de faca considerando uma estrutura com descontinuidade abrupta de relevo onde os fenômenos de reflexão e/ou difração encontram-se presentes [38, 39,40].

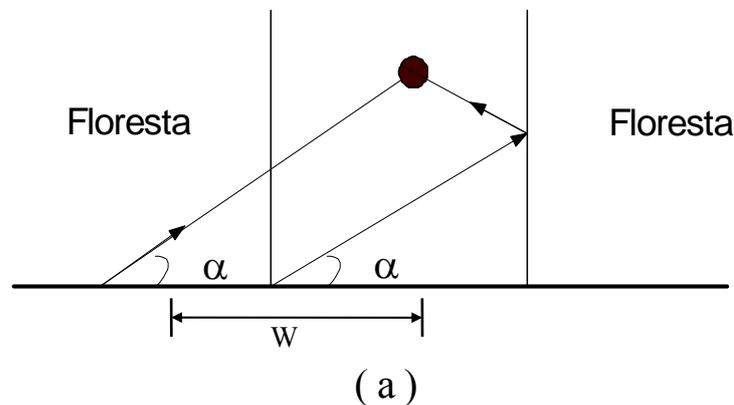
Este ambiente pode ser descrito como uma floresta atravessada por uma rodovia, aonde o sinal que chega a um receptor móvel é constituído por várias componentes de campo elétrico provenientes de diferentes direções.

A intensidade média do campo elétrico produzida pelos vários raios que chegam ao receptor é dada por,

$$E = \sqrt{\sum_{i=1}^k E_i^2} \quad (3.12)$$

onde E_i representa os campos médios para os i raios que chegam ao receptor e k é o número total de raios.

Foi verificado em [25] que as principais contribuições para determinação da intensidade do campo elétrico médio neste modelo são representadas pelos raios E_1 que sofre somente difração e o raio E_2 que sofre difração e reflexão na vegetação situada no outro lado da rodovia. A Figura 2.3 ilustra a geometria destes dois principais raios.



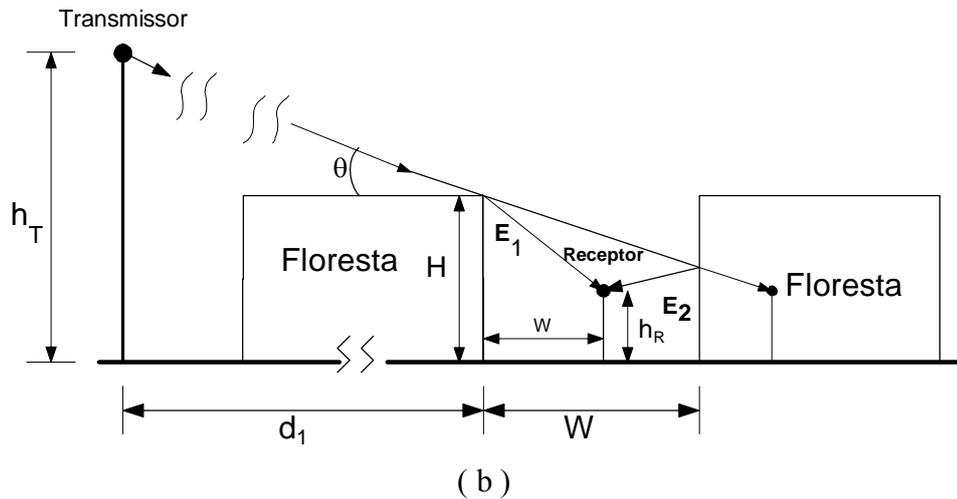


Figura.3.3 - Geometria para o modelo de Multiraios:(a) vista superior, (b) vista lateral

Para a determinação da atenuação são considerados vários fatores como a altura da floresta, largura da estrada e posicionamento do receptor móvel em relação à estrada.

A expressão geral para o campo elétrico recebido que difrata em um “gume de faca” é dada por [40]:

$$E = \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 \left| \left[\frac{1}{2} - C(v) \right] - j \left[\frac{1}{2} - S(v) \right] \right| \quad (3.13)$$

onde, E_0 é o campo no espaço livre que é definido pela seguinte expressão:

$$E_{0(rms)} = \frac{\sqrt{30 P_{1W} \cdot G_1}}{d_m} \text{ V / m} \quad (3.14)$$

e $C(v)$ e $S(v)$ são, respectivamente, as funções cosseno e seno integrais de Fresnel.

O parâmetro de Fresnel v é obtido quando é feita a suposição de que o ângulo θ na Figura 3.3 seja aproximadamente igual a zero grau, e os parâmetros de Fresnel v assumirão os seguintes valores:

$$v_1 = \sqrt{2} (H - h_r) \sqrt{\frac{d \cos^2 \alpha}{\lambda (d \cos \alpha - w) w}} \quad (3.15)$$

$$v_2 = \sqrt{2} (H - h_r) \sqrt{\frac{d \cos^2 \alpha}{\lambda (d \cos \alpha - 2W + w)(2W - w)}} \quad (3.16)$$

Assim, os valores das intensidades dos campos devido aos dois raios são dados por [40]:

$$E_1 = 0,225 E_0 / v_1 \quad (3.17)$$

$$E_2 = 0,225 E_0 R_{floresta} / v_2 \quad (3.18)$$

onde $R_{floresta}$ representa o coeficiente de reflexão para a floresta, que pode ser expresso tanto para a polarização vertical como para a polarização horizontal, onde suas expressões são dadas por:

$$R_v = \frac{\hat{E}_r}{\hat{E}_i} = \frac{(\varepsilon_r - jx)\text{sen } \Psi - \sqrt{(\varepsilon_r - jx) - \cos^2 \Psi}}{(\varepsilon_r - jx)\text{sen } \Psi + \sqrt{(\varepsilon_r - jx) - \cos^2 \Psi}}$$

$$R_h = \frac{\hat{E}_r}{\hat{E}_i} = \frac{\text{sen } \Psi - \sqrt{(\varepsilon_r - jx) - \cos^2 \Psi}}{\text{sen } \Psi + \sqrt{(\varepsilon_r - jx) - \cos^2 \Psi}}$$

onde:

$$x = \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} = \frac{18 \times 10^3 \sigma}{f(\text{MHz})} \quad (3.19)$$

Assim, a intensidade de campo elétrico médio é dada por,

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} \quad (3.20)$$

e a potência média recebida é,

$$P = \frac{1}{2}(E_1^2 + E_2^2) \quad (3.21)$$

3.12 – MODELO DE EQUAÇÕES PARABÓLICAS

3.12.1- Introdução

Este modelo realiza o cálculo da intensidade do campo elétrico produzido pelas ondas eletromagnéticas baseado no formalismo das equações parabólicas [41], possuindo a grande vantagem do reduzido tempo de cálculo computacional e pequenas margens de erro se comparado com outros modelos.

Para validação deste modelo foram realizadas campanhas de medições nos municípios de Benfica, Marituba e Barcarena no Estado do Pará. Foram utilizadas as frequências de 900 MHz para os testes em Benfica e Marituba e 1800 MHz para os testes em Barcarena. Os valores das medições obtidos para as configurações de transmissão foram comparados com os obtidos pela previsão usando o modelo de Equações Parabólicas [42], [43].

Para o modelamento, inicialmente, será considerado um ambiente composto por ruas com construções e vegetação e, em seguida, é aplicado o método de equações parabólicas para o cálculo dos campos elétricos considerando os parâmetros elétricos envolvidos neste ambiente simulado.

Para a solução da equação parabólica resultante, o esquema de diferenças finitas de Crank-Nicolson foi usado para pequenos ângulos (até 20 graus). Para grandes ângulos, de até 90 graus, foi usada a transformada de Fourier mista.

No final deste capítulo serão apresentados alguns resultados obtidos para Benfica, Marituba e Barcarena.

3.12.2-OModelo

Neste item será feita a descrição teórica do modelo, começando pela definição da equação de onda de Helmholtz [44]:

$$\left(\nabla^2 + k^2 n^2\right)\psi(x, y, z) = 0 \quad (3.22)$$

onde k é o número de onda e n é o índice de refração.

O modelamento da onda eletromagnética propagando-se requer a solução na forma tridimensional da equação da onda que é dada por:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + k^2 n^2 \psi = 0 \quad (3.23)$$

A definição de u , representando o campo elétrico, pode ser descrita como: $u(x, z) = e^{-ikx} \psi(x, z)$, e chamando Q como o operador pseudo-diferencial definido por [44]:

$$Q = \sqrt{\frac{1}{k^2} \frac{\partial^2}{\partial z^2} + n^2(x, z)} \quad (3.24)$$

Fatorando a equação 3.24,

$$\left(\frac{\partial}{\partial x} + ik(1-Q)\right)\left(\frac{\partial}{\partial x} + ik(1+Q)\right)u = 0 \quad (3.25)$$

As duas partes entre parênteses da equação 3.25 representam as ondas progressivas e regressivas respectivamente.

A aproximação parabólica padrão consiste em escrever $Q = \sqrt{1+q} \cong 1+0,5q$, a aproximação de Tappert [45], na equação 3.25, considera somente o termo correspondente as ondas progressivas; esta aproximação é válida somente para a propagação para ângulos entre 15–25° da horizontal [46].

Assim, a equação parabólica usada para pequenos ângulos fica:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}(x, z) + 2ik \frac{\partial u}{\partial x}(x, z) + k^2 (n^2(x, z) - 1)u(x, z) = 0 \quad (3.26)$$

Fazendo a discretização de 3.26 na direção x e z através do esquema de diferenças finitas de Crank-Nicolson, onde $\xi_m = (x_{m-1} + x_m)/2$ é o ponto médio na solução de x_{m-1} para x_m , $u_j^m = u(x_m, z_j)$, $b = 4ik(\Delta z^2/\Delta x)$ e $a_j^m = k^2(n^2(\xi_m, z_j) - 1)\Delta z^2$, obtém-se [42]:

$$u_j^m (-2 + b + a_j^m) + u_{j+1}^m + u_{j-1}^m = u_j^{m-1} (2 + b - a_j^m) - u_{j+1}^{m-1} - u_{j-1}^{m-1} \quad (3.27)$$

O índice de refração é dado pela expressão abaixo [46]:

$$n = \left[\epsilon_r + \frac{i\rho}{2\pi f \epsilon_0} \right]^{1/2} \quad (3.28)$$

onde ϵ_r é a permissividade relativa, ρ é a condutividade (S/m), f é a frequência (Hz), ϵ_0 é a permissividade no vácuo (F/m).

Para grandes ângulos, considerou-se neste trabalho o operador split proposto por Feit e Fleck [44].

$$Q \sim \sqrt{1+A} + \sqrt{1+B} - 1 \quad (3.29)$$

onde:

$$A = (1/k^2)(\partial^2/\partial x^2) \text{ e} \quad (3.30)$$

$$B = n^2(x) - 1.$$

Substituindo a equação 3.29 na parte progressiva da equação 3.25, obtemos o resultado [44]:

$$\frac{\partial u}{\partial x} - i \sqrt{k^2 + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}} - ik(n-2)u = 0 \quad (3.31)$$

A equação 3.31 é a equação parabólica para grandes ângulos (até 90 graus), para sua resolução foi usada a transformada de Fourier mista, implementada com as condições de contorno de impedância. O motivo para esta escolha é que se fosse escolhido o esquema de diferenças finitas seria necessário trabalhar com matrizes penta diagonais, no lugar das tri-diagonais, causando aumento no tempo computacional. Assim, a solução encontrada para a equação 3.31 para grandes ângulos é dada por:

$$\begin{aligned}
u(x + \Delta x, z) = e^{ik(n-1)\Delta x/2} & \\
& \left[\frac{2}{\pi} F_s \left\{ \frac{\alpha}{\alpha^2 + p^2} e^{i\Delta x(\sqrt{k^2 - p^2} - k)} U(x, p) \right\} + \right. \\
& - \frac{2}{\pi} F_c \left\{ \frac{p}{\alpha^2 + p^2} e^{i\Delta x(\sqrt{k^2 - p^2} - k)} U(x, p) \right\} + \\
& \left. + e^{i\Delta x(\sqrt{k^2 - \alpha^2} - k)} e^{-\alpha z} K(x) \right] \tag{3.32}
\end{aligned}$$

onde

$$U(x, p) = \alpha F_s \left\{ e^{ik(n-1)\Delta x/2} u(x, z) \right\} - p F_c \left\{ e^{ik(n-1)\Delta x/2} u(x, z) \right\} \tag{3.33}$$

Onde F_s e F_c são, respectivamente, as transformadas seno e cosseno, α representa as propriedades do meio em termos de permissividade complexa η e $K(x)$ é definido como [41]:

$$K(x) = \begin{cases} 2\alpha \int_0^\infty f(z) e^{-\alpha z} dz; & \text{Re}(\alpha) > 0 \\ 0; & \text{Re}(\alpha) \leq 0 \end{cases}, \tag{3.35}$$

Para validar o uso do modelo de equações parabólicas aplicado em um ambiente florestal, foi realizada uma campanha de medições em Benfica, Marituba e Barcarena, no Estado do Pará. Estes municípios são caracterizados por áreas de vegetação densa e rala, cortada por ruas pavimentadas com a presença de pequenas edificações. Em Benfica e Marituba foi utilizada a frequência de 900 MHz e em Barcarena foi usada a frequência de 1,8 GHz. Para os três municípios, foi usado veículo receptor móvel que se deslocou ao longo de uma estrada cortada por uma floresta, sendo os resultados das medições registrados e armazenados para posterior processamento.

Para a solução da equação parabólica para pequenos ângulos foi usado o método das diferenças finitas proposto por Crank e Nicolson e para a solução para grandes ângulos, usou-se a transformada de Fourier mista. O motivo para esta escolha foi que se fosse escolhido o esquema de diferenças finitas, seria necessário trabalhar com matrizes penta diagonais, no lugar das tri diagonais, causando aumento no tempo computacional.

Para calcular a perda de propagação através do método das equações parabólicas foi usada a equação abaixo:

$$L(\text{dB}) = 36,57 + 20 \log_{10} f + 20 \log_{10} |u_0| - 20 \log_{10} u - G_T - G_R \tag{3.36}$$

Sendo u_0 o campo elétrico a uma distância de referência (d_0), u_o campo elétrico recebido, f a frequência em GHz, e G_T e G_R os ganhos das antenas transmissora e receptora em dB, respectivamente.

Foram também realizadas simulações usando os consagrados modelos da literatura de Egli [47] e Lee [48] e posterior comparação com o modelo de equações parabólicas e os resultados das medições.

A Tabela 3.1 mostra os parâmetros considerados na análise dos modelos (Figura 3.3).

Tabela 3.1 – Parâmetros do modelo

Parâmetros	Símbolos	Valores		
		Benfica	Marituba	Barcarena
Frequência	F	900 MHz	900 MHz	1800 MHz
Altura média da floresta	H	12 m	14 m	14 m
Altura do transmissor	h_T	12 m	70 m	60 m
Altura do receptor	h_R	3 m	3 m	3 m
Ganho das antenas transmissora e receptora	G_T, G_R	2,14 db	2,14 dB	2,14 Db
Potência transmitida	P_T	30 dBm	22 dBm	44,5 dBm

As Figuras 3.4, 3.5 e 3.6 mostram as curvas representando as perdas de percurso verificadas nos municípios de Benfica, Marituba e Barcarena, respectivamente, através das medições, do uso do modelo de equações parabólicas para pequenos ângulos (NA) e para grandes ângulos (WA) e usando os consagrados modelos de Lee e Egli [49].

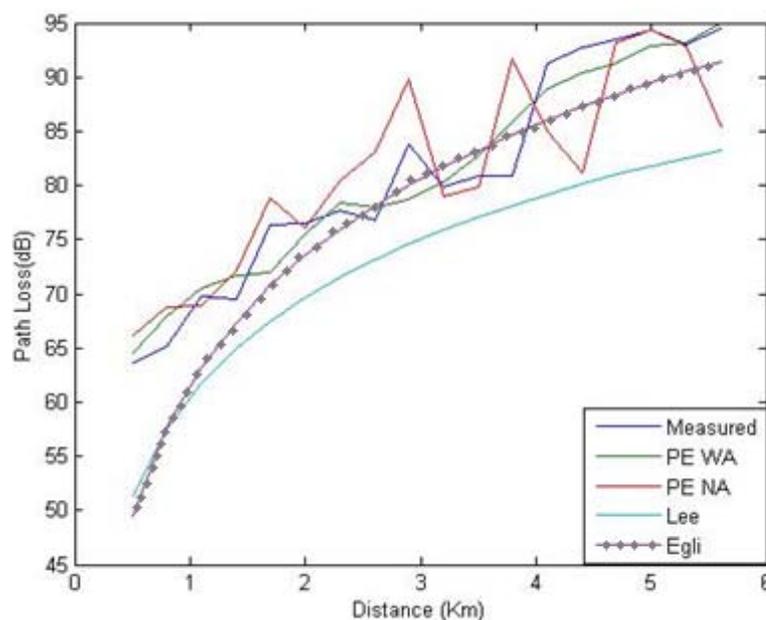


Figura3.4: Perda de percurso com a distância para Benfica

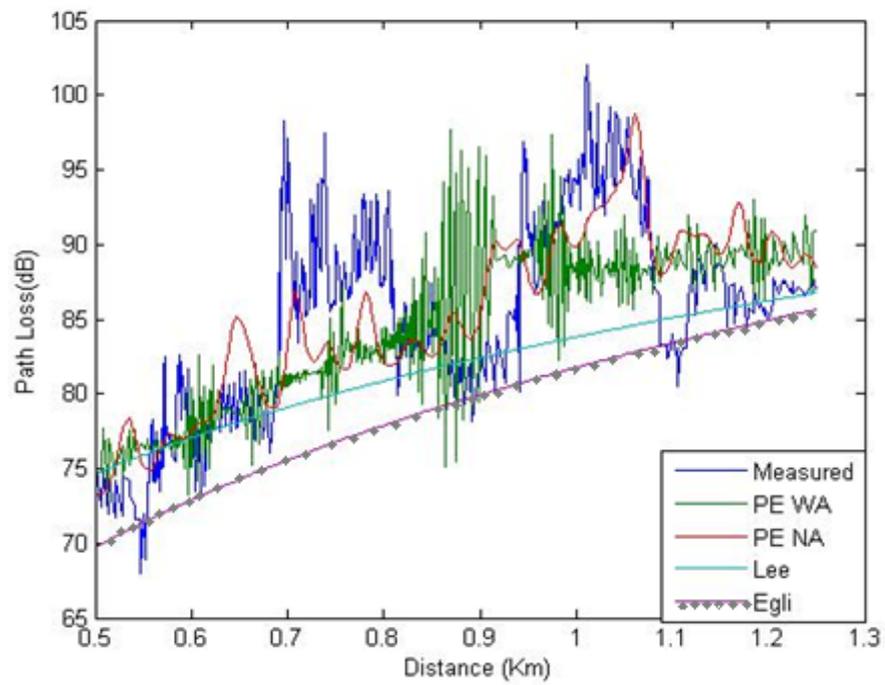


Figura 3.5: Perda de percurso com a distância Marituba

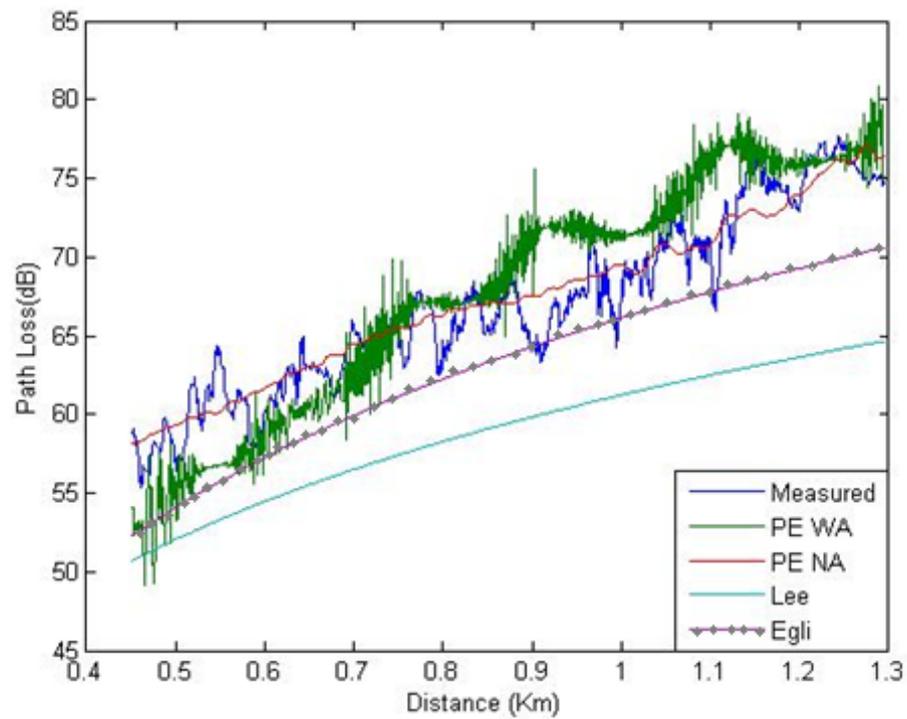


Figura 3.6: Perda de percurso com a distância para Barcarena

Nas Tabelas 3.2, 3.3 e 3.4 são mostrados o erro médio, o desvio padrão e o erro RMS para Benfica, Marituba e Barcarena, respectivamente obtidos através do método de equações parabólicas e dos modelos clássicos de Lee [47] e Egli.[48]. Onde se observa que os erros obtidos usando o método de equações parabólicas para pequenos e grandes ângulos foram bem próximos, porém estes erros foram bem menores que os obtidos pelos outros dois modelos.

Tabela 3.2 – Erro médio, desvio padrão e erro RMS para Benfica

	Modelo	Erro médio (dB)	Desvio padrão (dB)	Erro RMS(dB)
Benfica	Grandes ângulos	1,95	1,54	2,49
	Pequenos ângulos	3,78	3,72	5,30
	Lee	8,29	7,41	11,12
	Egli	4,43	3,94	5,93

Tabela 3.3 – Erro médio, desvio padrão e erro RMS para Marituba

	Modelo	Erro médio (dB)	Desvio padrão (dB)	Erro RMS (dB)
Marituba	Grandes ângulos	4,91	3,41	5,97
	Pequenos ângulos	4,03	3,02	5,04
	Lee	5,56	4,50	7,15
	Egli	7,89	5,82	9,80

Tabela 3.4 – Erro médio, desvio padrão e erro RMS para Barcarena

	Modelo	Erro médio (dB)	Desvio padrão (dB)	Erro RMS (dB)
Barcarena	Grandes ângulos	2,19	1,83	2,85
	Pequenos ângulos	3,26	2,28	3,98
	Lee	7,99	6,22	10,12
	Egli	3,68	2,41	4,40

3. 13– CONCLUSÃO

Este capítulo apresentou alguns dos principais modelos de propagação utilizados para predição de intensidade de campo elétrico para ambiente florestal.

Devido aos resultados teóricos estarem bem mais próximos das medições realizadas dentro da região florestal estudada, o modelo baseado no formalismo das equações parabólicas descrito neste capítulo recebeu uma atenção maior, sendo mostrados resultados de sua aplicação nos municípios de Benfica, Marituba e Barcarena.

No próximo capítulo, o método de inversão apresentado neste trabalho é usado para a determinação dos parâmetros elétricos equivalentes do solo e vegetação da região florestal amazônica. Para isto, foram realizadas medições da intensidade do campo elétrico recebido por uma estação móvel que se deslocava em ruas e estradas dentro dos municípios de Benfica, Marituba e Barcarena no Estado do Pará, e o uso do modelo de equações parabólicas para o cálculo da intensidade de campo elétrico.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

4.1 – INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados o ambiente de medições para as cidades de Benfica, Marituba e Barcarena, a metodologia teórica usada e os principais resultados encontrados através da análise quantitativa entre os valores obtidos para os parâmetros elétricos da vegetação e do solo usando o método de inversão por mínimos quadrados ponderados e os apresentados na literatura para a região florestal amazônica.

Este capítulo mostra ainda o uso do método de inversão através dos mínimos quadrados ponderados para a obtenção dos parâmetros elétricos do solo para seis rotas radiais que partiam da cidade de Brasília- Distrito Federal. Onde é realizada uma análise comparativa entre os valores da condutividade elétrica do solo estimados e os valores encontrados na literatura para aquela região.

4.2 – CENÁRIO DAS MEDIÇÕES

Os municípios de Benfica, Marituba e Barcarena no Estado do Pará formavam a região considerada, onde esta região era caracterizada por uma extensa área florestal coberta por uma vegetação densa cortada por ruas pavimentadas e algumas pequenas edificações. As Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 ilustram este cenário.



Figura 4.1 – Vista da rodovia de acesso à cidade de Benfica.



Figura 4.2 - Vista da cidade de Marituba.



Figura 4.3 – Vista do ambiente de medições para a cidade de Barcarena.

Para as cidades de Benfica e Marituba foram realizadas medições de um sinal de rádio na frequência de 900 MHz e para Barcarena foi usada a frequência de 1800 MHz. Em Benfica, o sinal era transmitido por uma antena colinear posicionada a 12 metros de altura, situada em uma estação da Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL). A Figura 4.4 mostra a torre onde estava posicionada esta antena.



Figura 4.4 – Torre da antena de transmissão para a cidade de Benfica.

Na cidade de Marituba, usou-se o transmissor de uma estação rádio base pertencente à empresa OI, sendo o mesmo constituído por uma antena omnidirecional com ganho de 2 dBi. Para a cidade de Barcarena, o transmissor foi instalado em uma estação rádio base da empresa TIM, e era constituído de uma antena painel com ganho de 17,5 dBi.

As medições foram realizadas com um receptor móvel que se deslocava com velocidade de 30 km/h em ruas pavimentadas que cortavam a região florestal nos três municípios. Na Figura 4.5 é mostrado o mapa do ambiente de medições para a cidade de Benfica com a posição do transmissor e o trajeto do receptor.



Figura 4.5 - Mapa do ambiente de medições para a cidade de Benfica.

4.3 – METODOLOGIA TEÓRICA

A estimação dos parâmetros elétricos da vegetação e solo para a região florestal nas três cidades, usando o método de inversão apresentado, foi realizada através do uso da técnica de otimização de Gauss-Newton, associada ao método de Busca Unidimensional.

O método de Gauss-Newton, como mencionado no segundo capítulo, descarta a derivação de segunda ordem presente na equação (2.6), com a finalidade de tornar o cálculo da função Hessiana mais fácil de ser realizado computacionalmente. A equação (2.17), repetida aqui, representa este método.

$$\bar{G}(\mathbf{x}) = \bar{W}_x^T \cdot \bar{W}_x + \mu \bar{J}^T(\mathbf{x}) \cdot \bar{W}_d^T \cdot \bar{W}_d \cdot \mathbf{I}_x$$

O vetor de parâmetros desconhecido do modelo $\bar{\mathbf{x}}$ foi assumido ser formado pelos seguintes elementos: permissividade relativa da vegetação, condutividades elétricas da vegetação, permissividade relativa do solo da rodovia e condutividade elétrica da rodovia, conforme representado a baixo:

$$\bar{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \varepsilon_f \\ \sigma_r \\ \varepsilon_f \\ \sigma_r \end{bmatrix}$$

Com a finalidade de tornar o processo de iteração na busca do mínimo da função objetivo mais rápido, foi também utilizado o método de busca linear ou busca unidimensional, o qual realizou a busca por um comprimento de passo v_k ao longo da direção de busca $\bar{\mathbf{p}}_k$ que produziu iterações $\bar{\mathbf{x}}_{k+1} = \bar{\mathbf{x}}_k + v_k \bar{\mathbf{p}}_k$ mais rápidas.

O processo de iteração termina quando uma das quatro condições apresentadas no item 2.7 do segundo capítulo ocorria.

4.4 – ANÁLISES QUANTITATIVAS

Neste item é apresentada uma análise dos resultados obtidos com o uso do método de inversão através dos mínimos quadrados ponderados na estimação dos parâmetros elétricos da vegetação e do solo de uma região típica amazônica.

Esta região é caracterizada por uma grande área florestal com vegetação densa cortada por ruas pavimentadas e pequenas edificações, onde foram realizadas as medições de sinal de rádio nas cidades de Benfica, Marituba e Barcarena.

Para a realização desta análise foram considerados os parâmetros representados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1- parâmetros para a floresta nas três cidades estudadas [25].

Parâmetros	Símbolos	Valores		
		Benfica	Marituba	Barcarena
Frequência	F	900 MHz	900 MHz	1800 MHz
Altura média da floresta	H	12 m	14 m	14 m
Altura da antena transmissora	h_T	12 m	70 m	60 m
Altura da antena receptora	h_R	3 m	3 m	3 m
Ganho da antena transmissora	G_T	2,14 dB	2,14 dB	2,14 dB
Ganho da antena receptora	G_R	2,14 dB	2,14 dB	2,14 dB
Potencia de transmissão	P_T	30 dBm	22 dBm	44,5 dBm
Largura da Rua	W	12 m	11 m	10 m
Posição do Receptor	w	7,75 m	6,5 m	7,0 m
Distância Inicial	d_I	500 m	450 m	450 m
Distância Final	d_F	5600 m	1300 m	1300 m
Permissividade relativa da floresta	ε_F	1,1	1,1	1,1

[27]				
Condutividade elétrica da floresta [27]	σ_F	0,1 mS/m	0,1 mS/m	0,1 mS/m
Permissividade relativa da rodovia [27]	ε_R	2,7	2,7	2,7
Condutividade elétrica da rodovia [27]	σ_R	40mS/m	40mS/m	40mS/m

O programa Visual Fortran 6.0 foi usado tanto para a obtenção dos valores de intensidade de campo elétrico quanto nas simulações do método de inversão para estimação dos parâmetros elétricos ótimos do solo e da vegetação, representados pelos seus valores de condutividades elétricas e permissividades relativas.

Na literatura as florestas podem ser classificadas por suas alturas e respectivos parâmetros elétricos, conforme mostrado abaixo pela Tabela 4.2.

Tabela 4.2- Tipo de floresta com seus parâmetros elétricos típicos [29].

Tipo de Floresta	Altura Média das Árvores, H (m)	Condutividade (mS/m)	Permissividade Relativa
Densa	20-30	0,3	1,3
Média	10-20	0,1	1,1
Rala	5-10	0,03	1,01

São mostrados nas Tabelas 4.3 e 4.4 os valores ótimos obtidos tanto para a vegetação existente nas cidades de Benfica, Marituba e Barcarena quanto para o solo das ruas situadas dentro destas cidades. Estas tabelas também mostram os valores dos parâmetros elétricos da vegetação e solo encontrados na literatura, e seus respectivos erros relativos.

Tabela 4.3 – Parâmetros ótimos para a floresta nas três cidades e seus erros relativos.

Parâmetros Elétricos	Benfica	Marituba	Barcarena
Condutividade Elétrica(mS/m) [29]	0,10	0,10	0,10
Permissividade Relativa[29]	1,10	1,10	1,10
Valor Estimado por este trabalho para a Condutividade Elétrica	0,14	0,14	0,14
Valor Estimado por este trabalho para a Permissividade Relativa	1,15	1,15	1,15
Erro Relativo (Condutividade)	0,4	0,4	0,4
Erro Relativo (Permissividade)	0,04	0,04	0,04

Tabela 4.4 – Parâmetros ótimos para as ruas nas três cidades e seus erros relativos.

Parâmetros Elétricos	Benfica	Marituba	Barcarena
Condutividade Elétrica (mS/m) [29]	40	40	40
Permissividade Relativa [29]	2,7	2,7	2,7
Valor Estimado por este para a Condutividade Elétrica	40	39,5	39,1
Valor Estimado por este trabalho para a Permissividade Relativa	2,55	2,65	2,65
Erro Relativo (Condutividade)	0	0,0125	0,0225
Erro Relativo (Permissividade)	0,05	0,018	0,018

Através das Tabelas 4.3 e 4.4, nota-se que os valores dos parâmetros elétricos ótimos estimados para a vegetação nas três cidades foram bem próximo dos apresentados na referência [29], mostrando erros relativos de 0,4 e de 0,04 para a condutividade elétrica e permissividade relativa, respectivamente. Da mesma forma, os erros relativos apresentados para os parâmetros do solo das ruas das cidades foram bem pequenos, na ordem de duas casas decimais, sendo que o erro relativo para a condutividade elétrica para as ruas na cidade de Benfica foi nulo.

Notou-se também com os resultados da Tabela 4.3 que os erros relativos para a condutividade elétrica para a floresta foram maiores que os erros apresentados para a permissividade relativa.

4.5 – RESULTADOS OBTIDOS PARA A REGIÃO CENTRO OESTE

4.5.1 – CENÁRIO

Com o objetivo de validar o método de inversão apresentado aqui para outra região do Brasil, neste item são analisados os resultados das medições de intensidade de campo elétrico realizadas pela Agência Nacional de Telecomunicações – ANATEL e a pela Empresa Brasileira de Comunicações - Radiobrás em seis rotas radiais que partiram da cidade de Brasília, Distrito Federal, em direção as cidades de Posse (Rota 1), Goiânia (Rota 2), Niquelândia (Rota 3), Arinos (Rota 4), Cristalina (Rota 5) e Goiás (Rota 6), sendo que o ambiente destas rotas é caracterizado por uma região rural típica do centro do Brasil. A Figura 4.6 ilustra este ambiente, destacando as seis rotas.



Figura 4.6 – Localização das rotas radiais onde ocorreram as medições de campo elétrico.

4.5.2 – SETUP DAS MEDIÇÕES

Para esta campanha de medições, o transmissor usado foi um gerador de ondas medias, o qual foi montado na sede da Radiobrás em Brasília, situada na Quadra 1, lote S|N no Plano Piloto. A tabela 4.5 mostra as características do transmissor.

Tabela 4.5 – Características do transmissor da RADIOBRÁS.

Localização	Centro da Cidade de Brasília 15°49'31,44" S 47°57'49,89" O
Frequência central	980 kHz
Largura de banda	10 kHz
Potência transmitida	50 kW ERP
Campo elétrico característico	319 mV/m
Campo elétrico nominal utilizável (E_{nom})	1.250 μ V/m
Altura da antena	94 m

Para as medições realizadas nas rotas 1,2 e 6 foi usada a Unidade Móvel de Rádio-monitoramento (MRU) da ANATEL, montada na França pela empresa Thales Communications. Esta unidade possui equipamentos destinados a medição de parâmetros técnicos como tipo de modulação, frequência, intensidade do campo elétrico, análise de espectro e taxas de ocupação. A Figura 4.7 ilustra o diagrama em blocos da MRU.

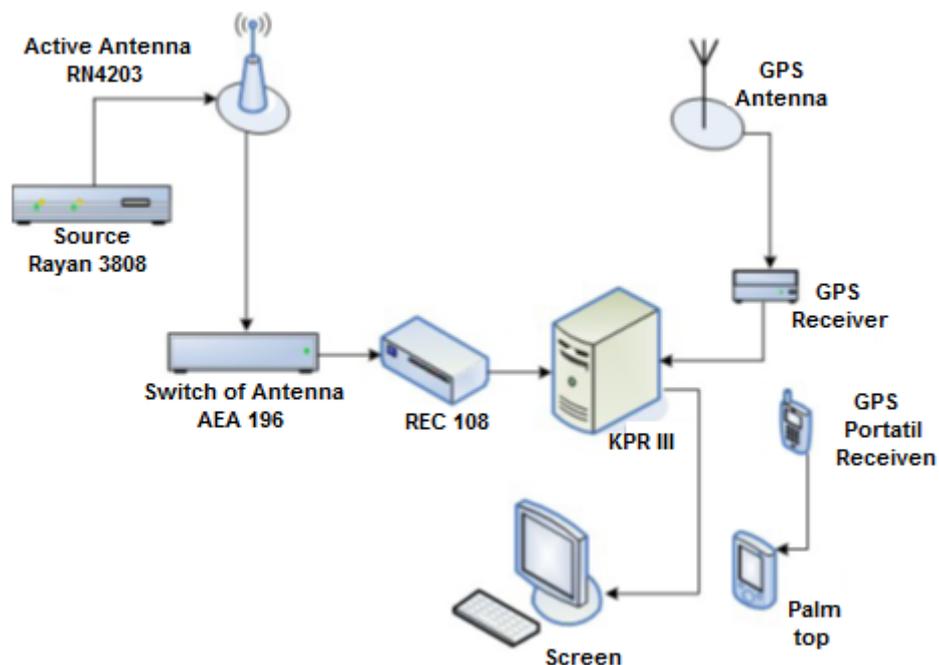


Figura 4.7 – diagrama em blocos do MRU.

Observando o digrama em blocos da Figura 4.7, nota-se que, inicialmente, o sinal modulado em amplitude (AM) foi capturado pela antena monopolo ativo RN4203 que o enviou para o

comutador de antena AEA196. Em seguida, o sinal seguiu em direção ao receptor REC108, o qual possui dois módulos, sendo que o primeiro translada o sinal de radiofrequência (RF) para a frequência intermediária (IF) e o segundo amostra o sinal e o demodula. Após esta etapa, as amostras do sinal foram enviadas para a unidade central de processamento KPRII, a qual obteve os valores da intensidade do campo elétrico para cada uma das amostras do sinal em frequência intermediária.

Para a obtenção e armazenamento das coordenadas geográficas, latitude e longitude, das amostras do sinal recebido em IF foi usado um GPS Trimble ligado à porta RS232 do KPRII.

Um GPS portátil também foi utilizado, sendo interligado a um Palm Top, com a finalidade de registrar as coordenadas geográficas dos locais onde havia variações bruscas no valor da intensidade do campo elétrico medido.

Nas rotas 3, 4 e 5 foi usada para a campanha de medições uma unidade móvel que pertence a Radiobras, onde houve também a participação de membros da equipe do consórcio sistema de radiodifusão digital DRM (*Digital Radio Mondiale*). Na Figura 4.8 é mostrado o sistema de medições instalado nesta unidade móvel.

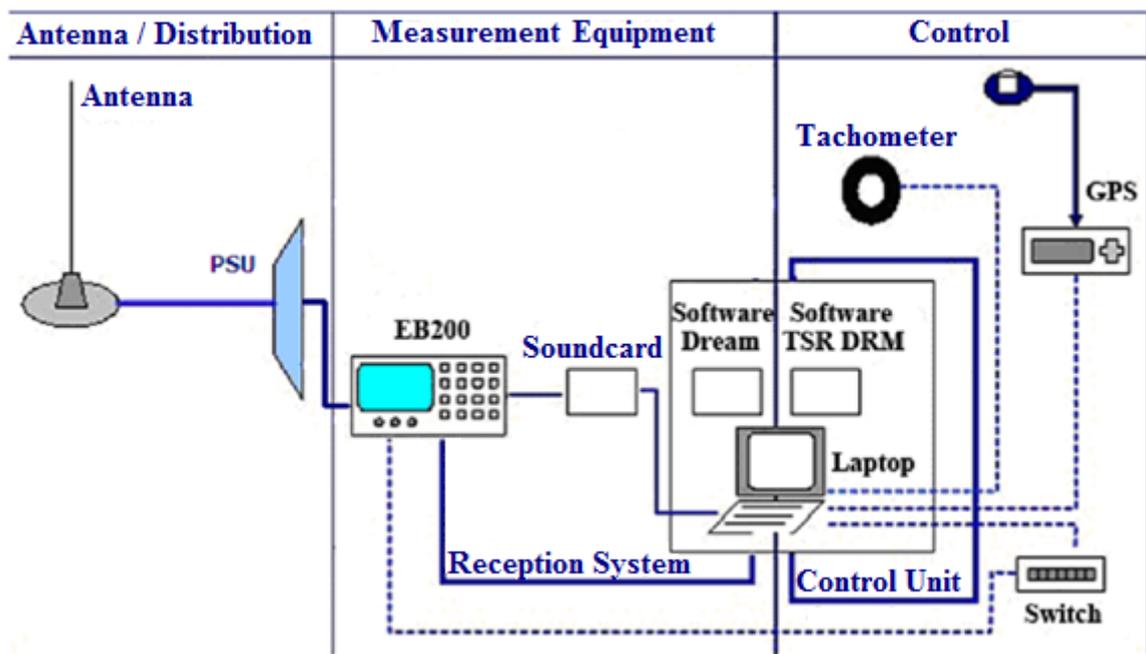


Figura 4.8 – diagrama em blocos da unidade móvel da RADIOBRAS.

Na a unidade móvel mostrada na Figura 4.7, uma antena monopolo curto, modelo HE010, recebia um sinal AM e o entregava a um PSU (*Power Suplly Unit*). Em seguida, este sinal era enviado para o receptor EB200 para a translação da faixa de RF para a faixa de FI e banda básica. A pós esta etapa, o sinal seguia para uma placa de som modelo Creative Sound Blaster 24 bit que estava ligada a uma porta USB de um *Lap Top*. Este *Lap Top* continha os programas Dream e TSR

DRM, que realizavam a demodulação do sinal e a captura do valor da intensidade do campo elétrico.

Para cada amostra obtida pelo programa TSR DRM, eram armazenados os valores da intensidade do campo elétrico recebido. Sendo também armazenadas as informações das coordenadas geográficas de cada uma das amostras medidas através de um GPS modelo 99xxGarmim.

4.5.3 – ANÁLISE COMPARATIVA

Neste item são apresentados os resultados obtidos com o uso do método de inversão através dos mínimos quadrados ponderados no processo de estimação dos parâmetros elétricos equivalentes do solo de uma região central do Brasil.

Esta região é constituída por um ambiente rural onde foram realizadas campanhas de medições de sinal de rádio em seis rotas radiais igualmente distribuídas que saíam da cidade de Brasília, Distrito Federal. Sendo que o transmissor foi instalado em um prédio da Empresa Brasileira de Comunicações, situado no centro de Brasília, o qual irradiava um sinal modulado em amplitude através de uma antena colinear posicionada a 94 m de altura.

Para as medições foram usadas duas unidades móveis, uma da ANATEL (rotas 1,2 e 6) e outra da Radiobras (rotas 3,4 e 5).

Como foi feito no caso da região amazônica, o programa Visual Fortran 6.0 foi usado tanto para a obtenção dos valores de intensidade de campo elétrico quanto para a simulação numérica do método de inversão para estimação dos parâmetros elétricos do solo. Sendo, também, definido um vetor de parâmetros desconhecidos do modelo composto por dois elementos: condutividade elétrica do solo e permissividade relativa do solo.

Após a aplicação do método de inversão, foram estimados os valores para a condutividade elétrica do solo e permissividade relativa do solo nas as seis rotas consideradas como mostrado na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - parâmetros elétricos estimados para o solo.

Rota	Condutividade elétrica	Permissividade
01	3,9	17
02	4,0	17
03	4,0	17
04	3,7	17
05	3,3	16
06	4,2	16

Através dos resultados apresentados na Tabela 4.7, pode-se observar que os valores estimados para a condutividade elétrica nas seis rotas estudadas são bem superiores ao valor recomendado pelo ITU para a região central do Brasil. Contudo, eles estão muito próximos dos resultados encontrados por LIMA [18], que desenvolveu uma metodologia que estimava a condutividade elétrica do solo através da comparação dos valores medidos da atenuação do sinal com os valores encontrados através do modelo de Terra Esférica para onda de superfície.

Também, verificou-se que os valores estimados para a permissividade relativa nas seis rotas, foram ligeiramente superiores ao valor adotado em [18].

Com o objetivo de avaliar o desempenho do método apresentado neste trabalho, são mostrados na Tabela 4.7 os valores ótimos da condutividade do solo estimados através do método de inversão e os obtidos na referência [18], sendo também apresentados os respectivos erros relativos entre os dois métodos para cada uma das seis rotas.

Tabela 4.7 – Condutividade elétrica do solo e erros relativos

Rota	Condutividade		Erro Relativo
	Método proposto	Referência[18]	
01	3,9	3,8	0,02
02	4,0	4,2	0,04
03	4,0	3,1	0,29
04	3,7	5,2	0,28
05	3,3	3,6	0,08
06	4,2	4,0	0,05

Na Tabela 4.8, observa-se que os valores estimados para a condutividade do solo para as rotas 1, 2, 5 e 6 estão bem próximos dos obtidos na referência [18], produzindo pequenos erros relativos. Para as rotas 3 e 4, os valores para os erros relativos foram um pouco maiores.

Estes resultados também estão de acordo com os obtidos na referência [19], onde foi usada uma metodologia baseada Redes Neurais Artificiais para estimar a condutividade elétrica do solo nas mesmas rotas estudadas neste artigo.

4.6 – CONCLUSÃO

Neste capítulo foi realizada uma análise quantitativa entre os valores dos parâmetros elétricos da vegetação e solo obtidos através do método de inversão por mínimos quadrados ponderados descrito no segundo capítulo e os valores destes parâmetros presentes na literatura.

Para validar este método, campanhas de medições da intensidade do campo elétrico foram realizadas nas cidades de Benfica, Marituba e Barcarena no Estado do Pará, assim como foi calculado o campo elétrico através do modelo baseado no formalismo das equações parabólicas, sendo que este modelo foi usado devido apresentar valores bem próximos dos obtidos nas medições quando comparado com alguns dos modelos clássicos descritos no capítulo 2, usados na determinação da perda de propagação.

Através da Tabela 4.3, verificou-se que os valores estimados para os parâmetros elétricos da vegetação existente nas três cidades estão de acordo com os valores apresentados para uma floresta tipo média, a qual foi considerada neste trabalho [29]. Quanto aos valores para solo da rodovia, mostrados na Tabela 4.4, estão de acordo com os mencionados na literatura. Desta forma, parece serem estes os valores mais adequados para a condutividade elétrica e permissividade relativa tanto da vegetação, quanto da rodovia, ficando assim bem mais fácil determinar o campo elétrico recebido com maior precisão.

Este capítulo também apresentou os valores estimados para os parâmetros elétricos do solo através do método de inversão em seis rotas radiais igualmente distribuídas em uma região rural do centro do Brasil. Onde, verificou-se que os valores obtidos para a condutividade elétrica do solo eram superiores aos recomendados pelo ITU, indicando que as áreas de cobertura das emissoras de rádio daquela região seriam bem superiores que as estabelecidas pela ANATEL.

Verificou-se também que estes valores da condutividade elétrica estimada para as seis rotas chegaram bem próximo dos apresentados em recentes estudos realizados naquela região [18-19], mostrando erros relativos muito pequenos para as rotas 1, 2, 5 e 6. Da mesma forma, os valores para a permissividade relativa foram próximos aos usados na região.

Assim, conclui-se que através do método de inversão apresentado neste trabalho é possível encontrar valores mais adequados para a condutividade elétrica e permissividade relativa tanto do solo e quanto da vegetação, ficando assim bem mais fácil determinar o campo elétrico recebido com maior precisão.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um método de inversão usando os mínimos quadrados ponderados para a determinação dos parâmetros elétricos equivalentes da vegetação e solo de uma região florestal típica amazônica com presença de vasta área de mata fechada. Estes parâmetros foram a condutividade elétrica e a permissividade relativa.

No capítulo 2, foi realizada uma descrição detalhada deste método de inversão e das principais técnicas de otimização conhecidas na literatura para a obtenção do mínimo da função objetivo que representava a diferença entre os valores medidos e os valores obtidos pela resposta de um modelo matemático. Sendo também, apresentada uma abordagem em termos de bayesianas para a minimização dos Mínimos Quadrados Ponderados.

Com a finalidade de caracterizar a região florestal, foram mostrados no capítulo 3, os resultados das campanhas de medições ocorridas nos municípios de Benfica, Marituba e Barcarena, no Estado do Pará, sendo que em Benfica e Marituba a frequência da transmissão utilizada foi 900 MHz e em Barcarena foi usada a frequência de 1800 MHz. Foi também apresentada uma análise comparativa destes resultados com os previstos pelos modelos de trajetória de raios, de equações parabólicas e alguns modelos presentes na literatura, onde foi verificado que as previsões usando o modelo de equações parabólicas foram bem mais próximas dos valores obtidos nas medições para os três municípios. Além do mais, verificou-se um reduzido tempo computacional na simulação do modelo de equações parabólicas se comparado com os demais modelos.

No capítulo 4, foi realizada uma análise quantitativa entre os valores ótimos dos parâmetros elétricos da vegetação e do solo estimados pelo método de inversão para as cidades Benfica, Marituba e Barcarena e os valores da literatura, onde se verificou que usando o método de inversão através dos mínimos quadrados ponderados resultou na obtenção de valores bem próximos dos encontrados na literatura.

Os valores apresentados no capítulo 4 representam resultados do uso do método de inversão para determinação dos parâmetros elétricos da vegetação e solo para cidades típicas da região florestal amazônica, considerando as campanhas de medições de sinal de rádio em frequências de comunicações móveis e usando o modelo de equações parabólicas para o cálculo dos valores de intensidade de campo elétrico. Com esta configuração, verificou-se que é possível determinar os parâmetros elétricos da vegetação e solo com uma boa precisão e, desta forma, caracterizar o canal radio móvel naquela região considerando valores de condutividade elétrica e permissividade

relativa mais próxima de seus valores reais e, assim, determinar com maior segurança a área de cobertura dos sistemas de comunicações móveis usados.

Também foram apresentados no capítulo 4 os resultados obtidos com o método de inversão em um ambiente rural localizado no centro do Brasil, o qual possuía uma geografia bem diferente da região amazônica e considerando frequências na faixa de ondas médias. Onde se verificou que os valores estimados para a condutividade elétrica do solo em seis rotas radiais igualmente distribuídos ficaram bem próximos dos apresentados em recentes estudos realizados naquela região.

Contudo, como os sistemas de maior interesse neste trabalho são os de transmissão de TV Digital e radio difusão sonora digital, cujas faixas de frequência são diferentes das usadas nas medições em Benfica, Marituba e Barcarena, haverá a necessidade de continuação do presente estudo através da realização de novas campanhas de medições nas referidas cidades com equipamentos configurados para as devidas faixas de frequência usadas nos novos sistemas de transmissão digital. Também será necessária a realização de novas simulações computacionais para a determinação do campo elétrico para a região, como o uso do formalismo das equações parabólicas para pequenos e grandes ângulos de propagação. Sendo, também, possível investigar a variação do valor da condutividade elétrica do solo para diferentes tipos e tipos do terreno.

Desta forma, pretende-se com esta tese de doutorado contribuir tanto para a caracterização do canal de rádio propagação para aplicações em faixas de frequência de TV Digital em floresta, quanto para o estudo das condutividades elétricas e permissividades relativas do solo, sendo estes importantes parâmetros a serem considerados na implantação no novo sistema de radiodifusão sonora brasileiro. E, finalmente, criar uma ferramenta para estimativa das propriedades elétricas equivalentes dos solos de outras regiões do país e gerar um mapa atualizado de condutividade dessas regiões e sua possível extensão a regiões similares que oriente os novos projetos de rádio enlaces tanto em ondas médias com em UHF.

Como sugestão para futuros trabalhos, o método de inversão aqui proposto poderá ser usado para a determinação da variação dos valores da condutividade elétrica do solo com a distância, considerando os vários tipos de terreno envolvidos no percurso de propagação. Também poderá ser feito o estudo comparativo dos resultados obtidos por outros métodos de determinação de parâmetros elétricos do solo com os obtidos pelo método de inversão, para a região amazônica.

REFERÊNCIAS

- [1] T. M. HABASHY, “A General Framework for Constraint Minimization for the Inversion of Electromagnetic Measurements,” appeared as a chapter in the book series Progress in Electromagnetic Research, PIER 46, 2004, pp. 265-312.
- [2] J. F. de SOUZA, F. N. B. MAGNO, Z. A. VALENTE, J. C. COSTA AND G. P. S. CAVALCANTE, ‘ Mobile Radio Propagation along Mixed Paths in Forest Environment using Parabolic Equation’, Microwave and Optical Technology Letters, Vol. 51 (4), april 2009, pp. 1133-1136.
- [3] H. W. PARKER e G. H. HAGN. “ Feasibility Study of the use of Open-Wire Transmission Lines, Capacitors and Cavities to measure the Electrical Properties of Vegetation” , Special Technical Report, No 43, SRI Project 4240, Menlo Park, California, august, 1966.
- [4] N. K. SHRANGER e E. M. KREINBERG, “ Selected Examples of VHF Signal Propagation Records in Tropical Terrains”, Special Technical Report, No 36, SRI Project 4240, Menlo Park, California, November 1967.
- [5] J. TAYLOR, C. C. HAN, C. L. TIEN e G. HAGN, ‘ Open-Wire Transmission Lines Applied to the Measurement of the Macroscopic Electrical Properties of a Forest Region” , STR 42, Technical Report ECOM-0220-42, SRI Project 8663, Menlo Park, California, October 1971.
- [6] H. W. PARKER e W. MAKARABHIROMYA, “ Electrical Constants Measure in Vegetation and in Earth at five sites in Thailand”, Special Technical Report, No 43, SRI Project 4240, Menlo Park, California, august, 1967.
- [7] G. E. BARKER, J. TAYLOR e G.H. HAGN, “ Summary of Measurements and Modeling of the Radiation Patterns of Simple HF Field Antennas in Open (Level) Terrain, Mountains and Forests”, Special Technical Report, No 45, SRI Project 8663, Menlo Park, California, December 1971.
- [8] C. E. MUEHE e L. CARTLEGE, “ Radar Propagation Measurement” , Workshop on Radio System in Forested and/or Vegetated Environments, Ft. Huachuca, Arizona, November 1973.
- [9] J. B. LOMAX, Ed., “ Propagation Limitations in Remote Sensing”, Proc. AGARD Conf., no 90, Technical Ed. and production Ltd., Harford House, London, October 1971
- [10] F. T. ULABY, “Radar Response to Vegetation” , IEEE. Trans. Antennas Propagation, vol. 23, no 1, January 1975.
- [11] G. P. S. CAVALCANTE, D. A. ROGERS e A. J. GIAROLA, “Radio Loss in forest using a model with four Layers media”, Radio Science, vol. 18, no 5, pp. 691-695, 1983.
- [12] M. JOACHIM, Y. Y. MAO e W. BOYLE, “Computer Programmer to Calculate Ground-Wave Field Strength”, Telecommunication Journal, vol. 40-IX, 1973
- [13] Federal, Communication Commission – Rules and Regulations- Ed. 1972.

- [14] L. F. M. CONRADO, “Um Estudo sobre Amplificadores de Micro-ondas”, CETUC, D-M0-08, pp. 192-205, março 1979.
- [15] J. T. PINHO; A. P. GOMES e G. P. S. CAVALCANTE, “Um Método para Avaliação do Simpósio Internacional de Microondas no Desenvolvimento Industrial – Brasil, CPqD-TELEBRAS, Campinas (SP), PP. 12-14, julho 1985.
- [16] O. D. RODRIGUES, “Analysis and validation of the electric terrain conductivity map of Mexico” *Geofísica Internacional*, Vol., 38, Num. 3, pp., 1999.
- [17] Rec. ITU-R P.832-2: “World atlas of ground conductivities”, 1999.
- [18] F. F. LIMA, A. J. M. SOARES, H. A. JUNIOR and L.M. da SILVA, “Field Intensity Measure in Medium Waves for Broadcasting Digitalization Planning in Brazil”. *IEEE AP-S/URSI/AMEREM 2006 Symposium*.
- [19] B. G. MONTEIRO; G.P.S. CAVALCANTE; H.S. GOMES e D. M. ROSÁRIO, “Evaluation of Radio Propagation Parameters for Field Strength Prediction Using Neural Network”, *International Microwave and Optoelectronics Conference*, 2007, Salvador, BA, October 2007.
- [20] W. P. CALIXTO, L.M. NETO, M. WU, K. YAMANAKA and E. da P. MOREIRA, 2010. Parameters estimation of a horizontal multilayer soil using genetic algorithm. *IEEE Trans. Power Delivery*, 25: 1250-1257.
- [21] S. VISACRO and R. ALIPIO, “Frequency Dependence of Soil Parameters: Experimental Results, Predicting Formula and Influence on the Lightning Response of Grounding Electrodes,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 27, No. 2, 2012, pp. 927-935.
- [22] T. M. HABASHY, , 2003, An inversion methodology using a weighted least-squares constrained minimization approach: Research note, Schlumberger-Doll Research, to be published.
- [23] N. ARORA e L. T. BIEGLER, “Redescending estimators for data reconciliation and parameter estimation. *Computers and Chemical Engineering* 25, 1585-1599, 2001.
- [24] S. S. RAO, “Engineering Optimization – Theory and practice”, 4 ed., John Wiley & Sons, New Jersey, 2009.
- [25] R. A. N. DE OLIVEIRA,; G. P. S. CAVALCANTE, A K-Ray Model to Mobile Systems in Forest Environments.. In: *ITS'98 - SBT/IEEE International Telecommunications Symposium*, 1998, SÃO PAULO. v. 1. p. 306-311.
- [26] C. R. BURROWS, “Ultra Short-wave propagation in Jungle”, *IEEE- trans. Antennas Propagation.*, vol. 14, pp. 386-388, 1968
- [27] C. R. BURROWS, “Radio Gain” , *IEEE- Trans. Antennas Propagation.*, vol. 15, N^o 3, pp. 404-410, 1967.
- [28] J. R. WAIT, “ Asymptotic Theory for dipole radiation in the presence of a loss slab lying on a conducting half – space” , *IEEE- trans. Antennas Propagation.*, vol. 15, NO 5, pp. 645-648, 1967.

- [29] T.TAMIR, , “ On Radio wave Propagation in Forest Environments” , IEEE- trans. Antennas Propagation., vol. 15, N^o 6, pp. 806-817, November 1967.
- [30] D. L. SACHS and P. J. WYATT, “ A Conducting – slab model for electromagnetic propagation within a Jungle Medium” , Radio Science, vol. 3, N^o 2, pp. 125-134, February 1968.
- [31] D.DENCE and T.TAMIR, “Radio Loss of lateral waves in forest environments” , Radio Science, vol. 4, pp. 307-318, 1969.
- [32] S. ROSENBAUM and L. W. BOWLES, “ Cluster Return from vegetated areas” , IEEE- trans. Antennas Propagation., vol. 22, NO 2, pp. 227-236, April 1974.
- [33] T. TAMIR, “ Radio wave Propagation along mixed path in Forest Environments” , IEEE- trans. Antennas Propagation., vol. 25, NO 4, pp. 471-477, 1977.
- [34] G. P. S. CAVALCANTE; D. A. ROGERS and A. J. GIAROLA, “Analysis of electromagnetic wave propagation in Radio Loss in Multilayered media using Dyadic Green`s functions” , Radio Science, vol. 17, no 3, pp. 503-508, 1982.
- [35] C. T. TAI, “Dyadic Green`s Function in Electromagnetic” , Intext, Scranton, Pa. 1971.
- [36] C. T. TAI, “Eigen function Expansion of Dyadic Green`s Function” , Math. Note 28, Weapons Syst. Lab., Kirkland Air Force Base, Albuquerque, N.M, 1973.
- [37] L. W. LI, “Wave propagation and communication within random in-homogeneous media” , PhD, dissertation, Inst. Electron. Acad. Sinica, Beijing, 100080 China, with China Res. Inst. Radio wave Propagation, Xinxiang, Henan, 453003, China, October 1990.
- [38] J. D. PARSON, - “The Mobile Radio Propagation Channel” - John Wiley & Sons, New York – 1992.
- [39] R. EDWARDS and J. DURKIN, - “Computer Prediction of Service Area for VHF Mobile Radio Networks” - Proc. IEE, 116 No 9 - 1969.
- [40] C. E. DADSON, - “Radio Network and Radio Link Surveys Derived by Computer from a terrain Data Base” ; Nato - Agard Conf. Publication - 1979.
- [41] K. H. CRAIG and M. LEVY, Parabolic Equation Modeling of the Effects of Multipath and Ducting on Radar Systems” , IEE Proceedings-F, vol. 138, no 2, pp. 152-162, April 1991.
- [42] JANASWAMY, Transparent Boundary Condition for the Parabolic Equation Modeled by the 4RW, IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 8, pp. 23-26, 2009.
- [43] P. VALTR and P. PECHAC, , Domain Decomposition Algorithm for Complex Boundary Modeling using the Fourier Split-Step Parabolic Equation, IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 6, pp. 152-155, 2007.
- [44] M. LEVY, Parabolic Equation Methods for Electromagnetic Wave Propagation, The Institution of Electrical Engineers, London, 2000.

- [45] E. PREMAT, “Prise en Compte d’effets Météorologiques dans une Méthode d’Eléments finis de Frontière”, Thèse de docteur, France, pp. 259-261, 2000. Pp.34-appendices, 1979.
- [46] J. J. EGLI, “Radio Propagation Above 40 MC Over Irregular Terrain”, Proceedings of the IRE, pp. 1383-1391, October 1957.
- [47] W. C. Y. LEE - “Mobile Cellular Telecommunications Systems”- McGraw Hill Bo. Co. - 1989.
- [48] R. A. N. DE OLIVEIRA, J. F. DE SOUZA, F. N. B. MAGNO, , K. COZZOLINO e G. P. S. CAVALCANTE, ‘Propagation Loss Path Prediction Using Parabolic Equations for narrow and wide angles’, 7th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP) 2013, pp.944-948.
- [49] R. A. N. DE OLIVEIRA, , J. F. DE SOUZA, F. N. B. MAGNO, K. COZZOLINO, e G. P. S. CAVALCANTE, ‘ Inversion Method for Obtaining Electrical Parameters for Soil in the Rural Region in Brazil’, Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications (JMoe), Vol. 14, No 1, June 2015, pp. 110-120.

ANEXO A – OUTROS TRABALHOS PUBLICADOS

R. A. N. de OLIVEIRA, J. F. de SOUZA, F. N. B. MAGNO, K. COZZOLINO, G. P. S. CAVALCANTE, “Análise do sinal de TV digital usando o Método de Equações Parabólicas para pequenos ângulos”, MOMAG 2014.

R. A. N. de OLIVEIRA, J. F. de SOUZA, F. N. B. MAGNO, K. COZZOLINO, G. P. S. CAVALCANTE, “Inversion Method for Obtaining Electrical Parameters for Soil and Vegetation in the Amazon Region”, 7th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP) 2013.

F. N. B. MAGNO; J. F. de SOUZA, G. P. S. CAVALCANTE, K. COZZOLINO, R. A. N. de OLIVEIRA. “Simulação da Perda de Propagação via Equações Parabólicas para as frequências de 1,9 e 2,4 GHz em ambientes indoor”. MOMAG 2012.

J. F. de SOUZA, F. N. B. MAGNO, G. P. S. CAVALCANTE, K. COZZOLINO, R. A. N. de OLIVEIRA. “Estudo da Perda de Propagação no Laboratório de Física da UFPA”. MOMAG 2012.

A.S. Teixeira; R. A. N. de OLIVEIRA, J. F. de SOUZA, F. N. B. MAGNO, G. P. S. CAVALCANTE. “Electric Field Prediction for Medium Waves Radio Broadcasting Using Parabolic Equations”. In: International Microwave and Optoelectronics Conference, 2011, Natal. Anais IMOC 2011.

G. P. S. CAVALCANTE; R. A. N. de OLIVEIRA; M.A.R. SANCHES. “Mobile Radio Propagation Along Mixed Path In Forest Environment”. Journal of Microwaves and Optoelectronics, v. 4, p. 1599, 1999.