



RALPH ROBERT HEINRICH

**ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS DE
PROPAGAÇÃO EM RADIO ENLACES DE CANAIS
BANDA LARGA NA FAIXA DE UHF**

**CAMPINAS
2013**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO**

RALPH ROBERT HEINRICH

**ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS DE
PROPAGAÇÃO EM RADIO ENLACES DE CANAIS
BANDA LARGA NA FAIXA DE UHF**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, na área de Telecomunicações e Telemática.

Orientador: Prof. Dr. Michel Daoud Yacoub

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO
DEFENDIDA PELO ALUNO RALPH ROBERT HEINRICH E ORIENTADA
PELO PROF. DR. MICHEL DAOUD YACOUB

**CAMPINAS
2013**

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

H364a Heinrich, Ralph Robert, 1954-
Análise das características de propagação em radio enlaces de canais banda larga na faixa de UHF / Ralph Robert Heinrich. – Campinas, SP : [s.n.], 2013.

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

1. Ondas de rádio - Propagação na troposfera. 2. Rádio - Transmissores e transmissão - Desvanecimento. 3. Sistemas de comunicação móvel - Ruído. 4. Long-Term Evolution (Telecomunicações). I. Yacoub, Michel Daoud, 1955-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Evaluation of a broadband radio channel propagation at UHF frequencies.

Palavras-chave em inglês:

Tropospheric radio wave propagation
Radio - Transmitters and transmission - Fading
Mobile communication systems - Noise
Long-Term Evolution (Telecommunications)

Área de concentração: Telecomunicações e Telemática

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora:

Michel Daoud Yacoub [Orientador]
Omar Carvalho Branquinho
Paulo Cardieri

Data de defesa: 27-08-2013

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Elétrica

COMISSÃO JULGADORA - TESE DE MESTRADO

Candidato: Ralph Robert Heinrich

Data da Defesa: 27 de agosto de 2013

Título da Tese: "Análise das Características de Propagação em Rádio Enlaces de Canais Banda Larga na Faixa de UHF."

Prof. Dr. Michel Daoud Yacoub (Presidente):  _____

Prof. Dr. Omar Carvalho Branquinho:  _____

Prof. Dr. Paulo Cardieri:  _____

A Deus toda Honra e toda Glória, por ter-me dado a oportunidade de conhecer mais um pouco de sua Criação através deste trabalho e por ter-me dado minha esposa e companheira, co-piloto e incentivadora em todos os momentos, inclusive nas viagens para as medições em campo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço especialmente:

- À Fundação CPqD – Centro de Pesquisas e Desenvolvimento em Telecomunicações, onde trabalhei e muito aprendi por mais de 35 anos. Ambiente de trabalho agradável e desafiador onde as atividades de coleta de dados de campo aconteceram no último semestre de 2012.
- Ao FUNTTEL – Fundo para o Desenvolvimento Tecnológico das Telecomunicações, de onde provém os recursos financeiros para o Projeto RASFA – Redes de Acesso Sem Fio Avançadas, no escopo do qual ocorreram as atividades deste trabalho.
- Ao meu amigo e orientador Prof. Dr. Michel Daoud Yacoub, com quem tive o prazer de compartilhar vários desafios acadêmicos e profissionais nos últimos 39 anos, inclusive este.
- À minha esposa Sylvia Helena Heinrich, que nos últimos 42 anos tem me apoiado no gosto pelas radiocomunicações e que me acompanhou, como co-piloto, durante todos os momentos do teste em campo.
- Ao meu filho, Engenheiro em Telecomunicações William Robert Heinrich, pelo apoio na implementação do software de controle do sistema de medição em campo e por compartilhar com entusiasmo as ideias deste trabalho.
- Ao meu filho, Analista de Sistemas Erick Robert Heinrich, por ter elaborado e mantido a página na Internet onde foram coletadas informações de radioamadores da região a respeito da intensidade e variações do sinal de teste durante a semana de ensaios em campo.
- Ao meu amigo Steven Patrick Rowe, que gentilmente revisou o texto em Inglês do artigo publicado na conferência IMOC-2013.
- Ao meu companheiro de trabalho Leandro Souza Silva, que auxiliou imensamente na operação do equipamento do Ponto de Transmissão durante a semana de testes.

RESUMO

Este projeto de pesquisa objetiva responder a algumas questões sistêmicas levantadas por ocasião do início do desenvolvimento do sistema LTE-450, parte integrante do projeto RASFA - Redes de Acesso Sem Fio Avançadas, conduzido pelo CPqD - Fundação Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações, com recursos do FUNTTEL - Fundo para o Desenvolvimento Tecnológico das Telecomunicações. Esse projeto visa, como um de seus objetivos, o desenvolvimento de um sistema de rádio acesso sem fio LTE-450, operando na faixa de 450 a 470 MHz, baseado na tecnologia LTE - *Long Term Evolution*. A faixa de 450 a 470 MHz está atribuída em base global desde 2007 para o Serviço Móvel, conforme identificado pela União Internacional de Telecomunicações na *World Radiocommunication Conference 2007*. A Anatel - Agência Nacional de Telecomunicações - publicou a nova destinação de uso para a faixa de 450 a 470 MHz em 20 de dezembro de 2010, através da Resolução n ° 558. Várias ações vêm sendo empreendidas em apoio ao uso da faixa 450 a 470 MHz, para a prestação de serviços banda larga sem fio para áreas rurais, como consta do Programa Nacional de Telecomunicações Rurais, publicado pela Portaria 431/2009 do Ministério das Comunicações, e do Plano Nacional de Banda Larga, publicado em 13 de maio de 2010. Entende-se que a faixa de 450 a 470 MHz é ideal para a implantação de serviços de banda larga sem fio em áreas rurais, devido às suas características de propagação. Por outro lado, a base de conhecimento sobre o canal rádio em sistemas de rádio acesso móvel banda larga considera o uso, em áreas urbanas, de faixas de frequências situadas entre 850 MHz e 3500 MHz. São notórias as diferenças entre as características de propagação nessas faixas e nas faixas de UHF, principalmente quando a área de prestação do serviço deixa de ser a urbana e passa a ser a rural. Nesse sentido, alguns requisitos sistêmicos podem ser questionados e mesmo redimensionados. Esses requisitos foram aqui endereçados através de levantamento de dados em campo e posterior análise crítica contra a base de conhecimento disponível. São questões como a amplitude do desvanecimento seletivo e por despolarização, a intensidade do ruído impulsivo, os modelos de propagação aplicáveis à área rural e à faixa de UHF, a variação da perda de percurso com a altura da antena do terminal e a discriminação de polarização da antena do terminal.

Palavras-chave: Ondas de rádio - Propagação na troposfera; Rádio - Transmissores e transmissão – Desvanecimento; Sistemas de comunicação móvel – Ruído; Long-Term Evolution (Telecomunicações).

ABSTRACT

This research project aims to answer some systemic issues raised during the early development of the LTE-450 radio access system, part of a project RASFA - Advanced Wireless Networks Access, led by CPqD Foundation - Center for Research and Development in Telecommunications with resources of FUNTEL - Technological Development of Telecommunications Fund. This project aims, as one of its objectives, the development of a LTE-450 wireless system, operating in the 450-470 MHz band, based on LTE - Long Term Evolution technology. The 450-470 MHz band is allocated, on a global basis, since 2007 for Mobile Service, as identified by the International Telecommunication Union in the World Radiocommunication Conference 2007. Anatel – The Brazilian National Telecommunications Agency has published a new destination for the 450-470 MHz band on December 20, 2010, through Resolution No. 558. Several actions have been undertaken in support of the use of the 450-470 MHz band, to provide wireless broadband services to rural areas, as set out in the National Rural Telecommunications Plan, published by the Decree 431/2009 of the Ministry of Communications and the National Broadband Plan (PNBL), published on May 13, 2010. It is understood that the 450-470 MHz band is ideal for deploying wireless broadband services in rural areas, due to its propagation characteristics. On the other hand, the base of knowledge about the mobile broadband access radio systems channel, considering the use in urban areas, situated between 850 MHz and 3500 MHz bands have notable differences between the propagation characteristics of these bands and the UHF bands, especially when the area of service provision ceases to be the urban and goes to the rural areas. Thus, some systemic requirements can be questioned and even resized. These requirements are addressed here through field data gathering and subsequent critical analysis against the knowledge base available. These issues are such as the extent of selective fading and depolarization, the intensity of the impulse noise, the propagation models applicable to the rural area and the UHF band, the variation of the path loss with the height of the terminal antenna and of terminal antenna polarization discrimination.

Keywords - *Tropospheric radio wave propagation; Radio - Transmitters and transmission – Fading; Mobile communication systems – Noise; Long-Term Evolution Telecommunications).*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama do Ponto de Transmissão.	12
Figura 2 - Perda por Retorno da antena instalada no Ponto de Transmissão.....	13
Figura 3 - Diagrama da Unidade Móvel.	14
Figura 4 - Fator de Forma do filtro de FI do FT-857D.....	15
Figura 5 - Receptor GPS ME-2000RW com base magnética, para uso veicular.	15
Figura 6 - Tela de operação do SW de controle.	16
Figura 7 - Antenas utilizadas na Unidade Móvel.	16
Figura 8 – Simulação de cobertura realizada pelo Radio Mobile.....	17
Figura 9 – Quatro rotas e oito radiais para a execução do Ensaio Móvel.	18
Figura 10 - Diagrama do Ponto de Transmissão para o Ensaio Fixo.	21
Figura 11 - Antenas Yagi H/V no Ponto de Transmissão.	21
Figura 12 - Unidade Remota utilizada no Ensaio Fixo.....	22
Figura 13 - Unidade Móvel em um dos pontos de medição.	23
Figura 14 - Pontos de medição escolhidos para o Ensaio Fixo	24
Figura 15 - Modelo de referência de dois raios.	27
Figura 16 - Reflexão de 10% a 500m do receptor e 50m fora do eixo do enlace.....	27
Figura 17 - Reflexão de 90% a 500m do receptor e 50m fora do eixo do enlace.....	28
Figura 18 - Reflexão de 10% a 500m do receptor e 500m fora do eixo do enlace.....	28
Figura 19 - Reflexão de 90% a 500m do receptor e 500m fora do eixo do enlace.....	29
Figura 20 - Desvanecimento seletivo em enlace curto de 10 km com obstrução severa... 31	31
Figura 21 - Desvanecimento seletivo em enlace longo de 57 km com obstrução suave... 31	31
Figura 22 - Desvanecimento seletivo em enlace curto de 10 km em área urbana.	32
Figura 23 - Posicionamento da Unidade Móvel no enlace de 10 km com obstrução severa e reflexões próximas em edificações e veículos de grande porte.	33
Figura 24 - Azimute do Ponto de Transmissão, a partir da Unidade Móvel, durante as medições de desvanecimento seletivo no enlace de 57 km.	34
Figura 25 - Enlace curto de 10 km em região urbana.	35
Figura 26 - Azimute do Ponto de Transmissão, a partir da Unidade Móvel, durante as medições de desvanecimento seletivo no enlace urbano.	35

Figura 27 - Ambientes de recepção para (a) enlace longo de 100 km sem obstrução próxima, (b) enlace médio de 57 km com obstruções suaves e (c) enlace urbano de 10 km com obstrução severa.	37
Figura 28 - Amplitude do ruído impulsivo à margem da Rodovia Fernão Dias.	38
Figura 29 - Amplitude do ruído impulsivo no centro de Pirassununga.	39
Figura 30 - Amplitude do ruído impulsivo no centro de São Paulo.	39
Figura 31 - Histograma da amplitude normalizada na Rod. Fernão Dias (dBm/Hz).	40
Figura 32 - Histograma da amplitude normalizada em Pirassununga (dBm/Hz).	40
Figura 33 - Histograma da amplitude normalizada em São Paulo (dBm/Hz).	41
Figura 34 - Percorso da Rota 1.	44
Figura 35 - Características da radial R1N.	45
Figura 36 - Altitude e nível de sinal (RSSI) medidos na radial R1N.	45
Figura 37 - Perda de percurso na radial R1N.	46
Figura 38 - Características da radial R1NO.	47
Figura 39 - Altitude e nível de sinal (RSSI) medidos na radial R1NO.	47
Figura 40 - Perda de percurso na radial R1NO.	48
Figura 41 - Percorso da Rota 2.	49
Figura 42 - Características da radial R2O.	50
Figura 43 - Altitude e nível de sinal (RSSI) medidos na radial R2O.	50
Figura 44 - Perda de percurso na radial R2O.	51
Figura 45 - Características da radial R2SO.	52
Figura 46 - Altitude e nível de sinal (RSSI) medidos na radial R2SO.	52
Figura 47 - Perda de percurso na radial R2SO.	53
Figura 48 - Percorso da Rota 3.	54
Figura 49 - Características da radial R3E.	55
Figura 50 - Altitude e nível de sinal (RSSI) medidos na radial R3E.	55
Figura 51 - Perda de percurso na radial R3E.	56
Figura 52 - Características da radial R3NE.	57
Figura 53 - Altitude e nível de sinal (RSSI) medidos na radial R3NE.	57
Figura 54 - Perda de percurso na radial R3NE.	58
Figura 55 - Percorso da Rota 4.	59

Figura 56 - Características da radial R4S.	60
Figura 57 - Altitude e nível de sinal (RSSI) medidos na radial R4S.	60
Figura 58 - Perda de percurso na radial R4S.	61
Figura 59 - Características da radial R4SE.	62
Figura 60 - Altitude e nível de sinal (RSSI) medidos na radial R4SE.	62
Figura 61 - Perda de percurso na radial R4SE.	63
Figura 62 - Perda de percurso LOS x 2R x NLOS	70
Figura 63 - Perda de percurso na polarização vertical.	70
Figura 64 - Perda de percurso na polarização horizontal.	71
Figura 65 - Aproximação NLOS para os cinco enlaces avaliados em campo para altura da antena do terminal de 2m, 6m e 10m, nas polarizações vertical e horizontal.	71
Figura 66 - Distribuição dos valores de α em relação à altura da antena do terminal, obtidos na aproximação NLOS dos valores de perda de percurso nas medições ponto-a-ponto. .	72
Figura 67 - Discriminação de polarização nos cinco pontos avaliados.	73
Figura 68 – Curvas de Rugosidade (Δh) de Terreno nos EUA [10].	76
Figura 69 – Atenuação por trechos utilizada no modelo <i>Longley-Rice</i>	78
Figura 70 – Parâmetros para avaliação da variabilidade no tempo Y_T	79
Figura 71 - Valores médios anuais de ΔN , N-units/km	84
Figura 72 – Parametrização do Perfil do Enlace, conforme recomendação ITU-R P.1812-2.	85
Figura 73 – Parametrização Default das Propriedades de Rede	88
Figura 74 – Predição de cobertura a partir do PTx – Ensaio Móvel (antena Omnidirecional).	91
Figura 75 - Predição de cobertura a partir do PTx – Ensaio Fixo (antena Yagi).	91
Figura 76 – Predição com parâmetros default para a rota R1N.	92
Figura 77 – Comparação entre o perfil do relevo utilizado pelo Radio Mobile e medido em campo com GPS, para a rota R1N [Altitude (m) X Distância (km)].	93
Figura 78 – Perda de Percurso simulada e medida para a Rota 1N [Atenuação (dB) X Distância (km)]	93
Figura 79 – [Erro (dB) X Distancia (km)] entre a perda de percurso simulada e medida.	94

Figura 80 - Perda de Percurso simulada e medida para a Rota 1N [Atenuação (dB) X Distância (km)], para 45% do percurso coberto por floresta e variabilidade de situação de 85%. 95	
Figura 81 - [Erro (dB) X Distancia (km)] entre a perda de percurso simulada e medida, para 85% das situações e 45% do percurso coberto por floresta.....	96
Figura 82 - Predição com parâmetros default para a rota R2SO.	97
Figura 83 - Comparação entre o perfil do relevo utilizado pelo Radio Mobile e medido em campo com GPS, para a Rota R2SO [Altitude (m) X Distância (km)]	97
Figura 84 - Perda de Percurso simulada e medida para a Rota 2SO [Atenuação (dB) X Distância (km)]	98
Figura 85 - Predição com parâmetros default para a rota R4SE.....	99
Figura 86 - Comparação entre o perfil do relevo utilizado pelo Radio Mobile e medido em campo com GPS, para a Rota R4SE [Altitude (m) X Distância (km)].	99
Figura 87 - Perda de Percurso simulada e medida para a Rota 4SE [Atenuação (dB) X Distância (km)]	100
Figura 88 – Predição da rota PTx-FA para ha=10m e parâmetros default.	101
Figura 89 - Predição da rota PTx-SE para ha=10m e parâmetros default.	101
Figura 90 - Predição da rota PTx-VA para ha=10m e parâmetros default.	102
Figura 91 - Predição da rota PTx-RE para ha=10m e parâmetros default.....	102
Figura 92 - Predição da rota PTx-HO para ha=10m e parâmetros default.	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Calibração do sinal de recepção do FT-857D.	14
Tabela 2 – Exemplo de formato do arquivo de coleta de dados (CSV).....	19
Tabela 3 – Exemplo de formato do arquivo de coleta de dados pós-processado.	19
Tabela 4 - Exemplo de registro associado aos dados coletados na Radial R1B.....	20
Tabela 5 - Pontos de medição para o Ensaio Fixo e valores estimados de sinal e atenuação de enlace.	25
Tabela 6 - Resumo dos resultados do Ensaio Móvel.	64
Tabela 7 - Pontos de recepção e sua distância ao ponto de transmissão.	66
Tabela 8 - Sinal recebido (RSSI) e perda de percurso (PL).....	66
Tabela 9 - Perda de percurso X Altura da antena do Terminal	67
Tabela 10 - Diferença na perda de percurso em função da polarização das antenas.....	68
Tabela 11 - Valores esperados de χ em função do ambiente.	69
Tabela 12 - Valores de γ obtidos na aproximação NLOS das medições ponto-a-ponto. ..	72
Tabela 13 – Parâmetro de Irregularidade do Terreno (Δh).....	75
Tabela 14 - Dados de entrada	81
Tabela 15 - Informação para o modelamento de perda em <i>clutters</i>	82
Tabela 16 - Zonas rádio-climáticas.....	83
Tabela 17 - Valores dos parâmetros derivados da análise do perfil do enlace	85
Tabela 18 – Característica de obstrução da 1ª. Zona de Fresnel para os cinco enlaces avaliados.	103
Tabela 19 – Resultados de campo e predição, para a perda de percurso (dB), em função da altura da antena da Unidade Remota, para as cinco rotas avaliadas.....	103
Tabela 20 - Desvios entre os valores simulados na predição e os valores efetivamente medidos em campo (dB), em função da altura da antena da Unidade remota, para as cinco rotas avaliadas.	104

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Anatel	Agência Nacional de Telecomunicações
BS	<i>Base Station</i> – Estação Rádio Base
CPqD	Fundação Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações
DS	<i>Delay Spread</i> – Espalhamento de Atraso
e.r.p.	<i>Effective Radiated Power</i>
FI	Frequência Intermediária
FUNTTTEL	Fundo para o Desenvolvimento Tecnológico das Telecomunicações
IMT	<i>International Mobile Telecommunication</i>
ITM	<i>Irregular Terrain Model</i>
LOS	<i>Line Of Sight</i> – Perda no Espaço Livre
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
MIMO	<i>Multiple Inputs X Multiple Outputs</i>
MMN	<i>Man Made Noise</i> – Ruído gerado pelo homem
NBS	<i>National Bureau of Standards</i> (Departamento do Comércio dos EUA)
PL	<i>Path Loss</i> – Perda de Percurso
PNBL	Plano Nacional de Banda Larga
PT	Ponto de Transmissão
SCM	Serviço de Comunicação Multimídia
SMP	Serviço Móvel Pessoal
SLP	Serviço Limitado Privado
STFC	Serviço Telefônico Fixo Comutado
UE	<i>User Equipment</i> – Terminal de Usuário
UHF	<i>Ultra High Frequency</i> (300 a 1000 MHz)
UIT-R	União Internacional de Telecomunicações – Radiocomunicações
UM	Unidade Móvel
UR	Unidade Remota
VHF	<i>Very High Frequency</i> (30 a 300 MHz)
ZF	Zona de Fresnel

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	IX
RESUMO.....	XI
ABSTRACT.....	XIII
LISTA DE FIGURAS	XV
LISTA DE TABELAS.....	XIX
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	XXI
SUMÁRIO.....	XXIII
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 - MOTIVADORES	1
1.2 - OBJETIVOS DA AVALIAÇÃO EM CAMPO	2
1.2.1 - Avaliação do Desvanecimento Seletivo	2
1.2.2 - Avaliação do Desvanecimento por Despolarização	3
1.2.3 - Avaliação da Intensidade do Ruído Impulsivo	3
1.2.4 - Perda de Percurso (Modelo de Propagação)	4
1.2.5 - Perda de Percurso X Altura da Antena	5
1.2.6 - Discriminação de Polarização da Antena do Terminal.....	6
1.2.7 - Modelos de propagação.	6
1.3 - CAMPANHA DE MEDIDAS.	9
1.4 - ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	10
CAPÍTULO 2 - DESENVOLVIMENTO DO ENSAIO.....	11
2.1 - ENSAIO MÓVEL (PONTO-ÁREA)	11
2.1.1 - Descrição do Ponto de Transmissão.....	11
2.1.2 - Descrição da Unidade Móvel	13
2.1.3 - Planejamento das Rotas para o Ensaio Móvel	17
2.1.4 - Formato e pós-processamento dos dados do Ensaio Móvel	18
2.2 - ENSAIO FIXO (PONTO-MULTIPONTO)	20
2.2.1 - Descrição do Ponto de Transmissão.....	20
2.2.2 - Descrição da Unidade Remota	22
2.2.3 - Planejamento dos pontos de medida para o Ensaio Fixo.....	23
2.3 - DESENVOLVIMENTO DO ENSAIO – CONCLUSÕES	25

CAPÍTULO 3 - RESULTADOS DOS TESTES EM CAMPO	26
3.1 - DESVANECIMENTO SELETIVO.....	26
3.2 - POLARIZAÇÃO DA FRENTE DE ONDA	36
3.3 - RUÍDO IMPULSIVO.	38
3.4 - PERDA DE PERCURSO.....	42
3.4.1 - Resultados do Ensaio Móvel.....	43
3.4.2 - Resumo dos resultados obtidos no Ensaio Móvel	64
3.4.3 - Resultados do Ensaio Fixo.....	66
Variação da Perda de Percurso em Função da Altura da Antena do Terminal.	67
Variação da Perda de Percurso em Função da Polarização das Antenas.	67
Avaliação da Perda de Percurso Ponto-a-Ponto.....	68
Discriminação de polarização no ponto de recepção (terminal).....	73
CAPÍTULO 4 - ANÁLISE DOS MODELOS DE PROPAGAÇÃO.....	74
4.1 - ANÁLISE DO MODELO <i>LONGLEY-RICE</i>	74
4.2 - ANÁLISE DO MODELO ITU-R P.1821-2.....	80
4.3 - CONCLUSÕES SOBRE A ANÁLISE DOS MODELOS DE PROPAGAÇÃO.	86
CAPÍTULO 5 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE PREDIÇÃO E DE CAMPO	88
5.1 - ENSAIO MÓVEL – R1N:	92
5.2 - ENSAIO FIXO:.....	100
5.3 - CONCLUSÕES SOBRE A COMPARAÇÃO DE RESULTADOS SIMULADOS E MEDIDOS EM CAMPO.	104
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	106
6.1 - DESVANECIMENTO SELETIVO.....	106
6.2 - DESVANECIMENTO POR DESPOLARIZAÇÃO	106
6.3 - RUÍDO IMPULSIVO	106
6.4 - PERDA DE PERCURSO (MODELO DE PROPAGAÇÃO)	107
6.5 - PERDA DE PERCURSO X ALTURA DA ANTENA	108
6.6 - DISCRIMINAÇÃO DE POLARIZAÇÃO DA ANTENA DO TERMINAL	108
6.7 - ADEQUAÇÃO DO MODELO <i>LONGLEY-RICE</i>	109
6.8 - ADEQUAÇÃO DO MODELO ITU-R P.1812-2.....	109
6.9 - TRABALHOS FUTUROS.....	109
REFERÊNCIAS.....	110

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 - MOTIVADORES

A Anatel publicou a nova destinação de uso para a faixa de 450 a 470 MHz em 20 de dezembro de 2010 através da Resolução n° 558 [1]. O regulamento destina as subfaixas de 451 a 458 MHz e 461 a 468 MHz, em caráter primário e sem exclusividade, para os Serviços Móvel Pessoal (SMP), Telefônico Fixo Comutado (STFC) e de Comunicação Multimídia (SCM). Várias ações vêm sendo empreendidas em apoio ao uso da faixa 450 a 470 MHz para a prestação de serviços banda larga sem fio para áreas rurais e urbanas não atendidas. O Programa Nacional de Telecomunicações Rurais (Ministério das Comunicações Portaria #431/2009) [2], que visa melhorar o acesso aos serviços de telefonia e banda larga em áreas rurais e escolas, indicou a faixa de 450 a 470 MHz como preferencial. Em 12 de maio de 2010, foi emitido o decreto que implantou o PNBL - Plano Nacional de Banda Larga [3]. De acordo com o anúncio oficial do governo, o objetivo principal do PNBL é triplicar o acesso em banda larga até 2014, através do fornecimento de acesso a 40 milhões de famílias com pacotes básicos a partir de USD 20. O PNBL propôs a atribuição da faixa de 450 a 470 MHz, entre outras, para a prestação de serviços de banda larga sem fio, de modo a promover o acesso universal à banda larga, mitigando a exclusão digital. A faixa de 450 a 470 MHz já está atribuída em base global, desde 2007, para o serviço móvel (IMT - *International Mobile Telecommunications*), conforme identificado pela UIT na Conferência Mundial de Radiocomunicações (WRC-07) [4].

Entende-se que a faixa de 450 a 470 MHz seja ideal para a implantação de serviços de banda larga sem fio em áreas rurais, devido às suas características de propagação. Por outro lado, a base de conhecimento sobre o canal rádio de sistemas de rádio acesso móvel e banda larga considera o uso de faixas de frequências situadas entre 850 MHz e 3500 MHz. São notórias as diferenças entre as características do meio propagante nessas faixas e nas faixas de UHF abaixo de 1 GHz. Essas diferenças são maiores ainda quando a área de prestação do serviço deixa de ser a área urbana e passa a ser a área rural. Nesse sentido, alguns requisitos sistêmicos demandados dos equipamentos rádio, como das Estações

Rádio-Base e dos Terminais de Usuário, podem ser questionados e mesmo redimensionados.

O projeto RASFA - Redes de Acesso Sem Fio Avançadas, conduzido pelo CPqD com recursos do FUNTTEL, tem como um de seus objetivos o desenvolvimento de um sistema de rádio acesso sem fio operando na faixa de 450 a 470 MHz, baseado na tecnologia de acesso LTE - *Long Term Evolution*. Esse projeto de desenvolvimento levantou questões a respeito de requisitos sistêmicos, para as quais pouca ou nenhuma informação está disponível nos acervos de conhecimento da área. Portanto, um ensaio em campo se fez necessário para o levantamento de informações preliminares sobre essas questões.

1.2 - OBJETIVOS DA AVALIAÇÃO EM CAMPO

A avaliação em campo visou obter respostas para as questões levantadas, que têm implicações em requisitos sistêmicos, tais como:

1.2.1 - Avaliação do Desvanecimento Seletivo

O desvanecimento seletivo corresponde a variações pontuais na perda de percurso em frequências específicas de um canal largo. Essas variações afetam a amplitude dentro da largura de faixa do canal, que deverão ser compensadas pelo equalizador do sistema de recepção do Terminal ou da Rádio-Base. Esse efeito é esperado em ambientes urbanos, onde a propagação por multipercursos é uma característica. A profundidade do desvanecimento seletivo e sua seletividade dependem da característica de multipercurso, normalmente avaliada através do Espalhamento de Atraso (*Delay Spread*) entre os vários percursos. É esperado, portanto, que o desvanecimento seletivo em ambiente rural seja mínimo ou inexistente, principalmente quando o Terminal for uma estação fixa com antena diretiva instalada a uma altura adequada.

Por outro lado, uma das técnicas largamente utilizadas em sistemas de rádio acesso banda-larga, como no caso de sistemas LTE, é a arquitetura MIMO - *Multiple Inputs /*

Multiple Outputs. Essa técnica demanda a multiplicação dos circuitos de transmissão e recepção (MIMO MxN), oferecendo o aumento da disponibilidade ou da capacidade de tráfego. A eficiência do uso do MIMO depende de um ambiente com alta densidade de multipercursos, como em um ambiente *indoor* ou *outdoor* urbano denso. Portanto, a caracterização do ambiente de propagação rural, quanto ao multipercurso, poderá implicar em alteração profunda na arquitetura dos equipamentos.

1.2.2 - Avaliação do Desvanecimento por Despolarização

A perda de percurso pode ser afetada por uma perda adicional devido à despolarização da frente de onda, quando da reflexão em elementos dispersores, principalmente aqueles próximos ao ponto de recepção. A propagação de sinais nas faixas de UHF admite enlaces de dezenas de quilômetros, que, não raro, se formam sobre morfologias diferentes, como regiões suburbanas, bosques, espelhos d'água, etc.

Algumas dessas morfologias sofrem alterações diárias, semanais ou mensais com respeito ao clima, tendo a variação do índice de refração com a altura alterada em função das variações de temperatura e umidade. Essas influências sobre a morfologia podem acarretar variações na atenuação do enlace ao longo do tempo, devido, entre outros efeitos, à despolarização da frente de onda.

A análise da despolarização da frente de onda no ponto de recepção tem por objetivo subsidiar a decisão pelo uso de sistemas radiantes com diversidade de polarização.

1.2.3 - Avaliação da Intensidade do Ruído Impulsivo

O ruído impulsivo, também conhecido como ruído gerado pelo homem (*Man Made Noise*), é o ruído proveniente de motores elétricos, inversores chaveados com tiristores, sistemas de ignição de motores a explosão, entre outros. Se por um lado esse ruído tende a diminuir em áreas rurais, por outro lado tende a aumentar nas faixas de frequências mais baixas, como as de UHF.

É esperada uma variação de intensidade da ordem de 30 dB/década [12], ou seja, o ruído impulsivo pode ser 30 dB maior em 200 MHz do que aquele percebido em 2 GHz. Grosso modo, pode-se estimar que o ruído impulsivo na faixa de frequências de 450 a 470 MHz pode ser cerca de 20 dB maior do que o ruído impulsivo experimentado nas faixas do SMP (1,8 a 2,1 GHz).

A avaliação em campo do ruído impulsivo em regiões rurais e nas proximidades de cidades de pequeno, médio e grande porte, poderá oferecer insumos para decisão sobre a necessidade de estratégias para redução de ruído através de processamento em RF ou em Banda Base, nos receptores das Estações Rádio-Base e Terminais.

1.2.4 - Perda de Percurso (Modelo de Propagação)

As faixas de frequências entre 850 MHz e 3500 MHz vêm sendo utilizadas intensamente pelo SMP de forma global. Essa aplicação intensiva, na prestação de um serviço de telecomunicações altamente competitivo e rentável, fez surgir nas últimas décadas uma grande diversidade de modelos de propagação destinados à previsão de cobertura ponto-área e mitigação de interferências intra e intersistemas. São tipicamente modelos estatísticos elaborados a partir de bases de dados resultantes de medições realizadas em vários ambientes urbanos e suburbanos. O mesmo não aconteceu com as faixas de UHF até hoje fortemente utilizadas pelo Serviço Limitado Privado (SLP) e pelo Serviço de Radiodifusão de Som e Imagem (TV).

Algumas modelagens para a predição de cobertura, ou perda de percurso, ocorreram por iniciativa da engenharia de radiodifusão, a partir dos sinais gerados por emissoras de rádio e TV em VHF e UHF. Uma dessas iniciativas foi empreendida por *A. G. Longley* e *P. L. Rice*, na década de 60, para o NBS - *National Bureau of Standards* (Departamento do Comércio dos EUA) [5][6]. Esse modelo, conhecido como ITM - *Irregular Terrain Model* foi desenvolvido primordialmente para a predição de cobertura e definição do contorno protegido para as emissoras de TV nas faixas de VHF e UHF. O modelo *Longley-Rice*, ou ITM, foi codificado e disponibilizado livremente em dois

aplicativos (SW) conhecidos como, por exemplo, o *Radio Mobile* [7], para plataforma Windows.

No período compreendido entre 2001 e 2003 a ITU-R publicou a recomendação ITU-R P.1546-1 - *Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3000 MHz* [8]. Essa recomendação apresenta curvas relacionando a intensidade do campo elétrico, em dBuV/m, com a distância de um ponto de transmissão com potência de 1 kW e.r.p..

Tais curvas foram baseadas em medições exaustivas em campo e demandam interpolação para seu uso em situações específicas. Em fevereiro de 2012, a ITU-R publicou a recomendação P.1812-2 - *A path-specific propagation prediction method for point-to-area terrestrial services in the VHF and UHF bands* [9], complementar à recomendação P.1546-1, na qual são definidos modelos analíticos que consideram os seguintes elementos: Perda no Espaço Livre (LoS – *Line of Sight*), difração em terrenos suaves e irregulares, espalhamento troposférico, anomalias de propagação, variabilidade de local e perdas de penetração em prédios.

1.2.5 - Perda de Percorso X Altura da Antena

Enlaces na faixa de UHF apresentam, tipicamente, obstrução parcial ou total da primeira Zona de Fresnel (ZF). São enlaces com propagação em difração. A altura das antenas de transmissão e de recepção tem, portanto, forte influência sobre a fração obstruída da primeira ZF. É de se esperar que a perda de percurso seja reduzida substancialmente quando a altura da antena de recepção aumenta. A morfologia próxima à antena do Terminal, composta pela vegetação e edificações locais, cria um ambiente de dispersores que aumenta a variação da perda de percurso nos primeiros três a quatro metros de altura da antena.

A avaliação da variação da perda de percurso como função da altura da antena do Terminal tem por objetivo determinar a sensibilidade desse parâmetro, implicando em requisitos específicos para a implantação da Estação Terminal.

1.2.6 - Discriminação de Polarização da Antena do Terminal

A otimização da capacidade sistêmica de um sistema celular de rádio acesso, passa pela aplicação da técnica de reuso, quer seja de reuso de frequência, quer seja de reuso de polarização. Um parâmetro importante para a avaliação de viabilidade da aplicação de reuso de polarização é a discriminação de polarização, ou seja, a capacidade de uma antena, operando em uma dada polarização, rejeitar o sinal recebido na polarização ortogonal (*Cross-Pol*). Parte dos ensaios em campo objetivou a caracterização desse parâmetro que tem forte impacto na capacidade sistêmica.

1.2.7 - Modelos de propagação.

Foram selecionados, em função da faixa de frequências e da topografia e morfologia da área de serviço pretendida (área rural), modelos analíticos para predição de propagação em difração, tipicamente em tropodifusão. A descrição desses modelos é apresentada sucintamente a seguir:

Modelo Longley-Rice.

O modelo *Longley-Rice*, também conhecido como o modelo para terrenos irregulares (ITM – *Irregular Terrain Model*), foi criado para atender às necessidades de planejamento para a radiodifusão televisiva nos Estados Unidos na década de 1960 e foi amplamente utilizado para preparar os planos de atribuição de canais de TV nas faixas de VHF e UHF. O modelo tem duas partes: um modelo para a previsão de cobertura ponto-área e um modelo para previsão de enlaces ponto-a-ponto.

O modelo *Longley-Rice* foi proposto para a faixa de frequências entre 20 MHz e 20 GHz, para diferentes cenários e diferentes alturas das antenas de transmissão e recepção. O modelo apresenta uma generalização da potência do sinal recebido sem caracterizar detalhadamente o canal. Para compensar a não caracterização do canal, este modelo utiliza recursos estatísticos para cada cenário e ambiente.

A atenuação do sinal é determinada pelo modelo de previsão de acordo com as variações da atmosfera, do perfil topográfico e da atenuação no espaço livre. Estas atenuações são descritas com a ajuda de estimativas estatísticas, que contribuem para a atenuação total do sinal. As estimativas estatísticas, ou variáveis de atenuação deste modelo de previsão, são:

- I) Variabilidade de Situação
- II) Variabilidade de Tempo
- III) Variabilidade de Localização

A atenuação de referência é determinada em função da distância, das variáveis de atenuação e do fator para cobertura de área ou predição ponto-a-ponto.

Devido a esta variabilidade, desvios mais ou menos significativos são considerados na atenuação do sinal transmitido. O sinal recebido é obtido a partir do nível do sinal atenuado no espaço livre, acrescido da soma da atenuação formada pelas variáveis aleatórias. Se os pontos de transmissão e recepção são conhecidos, a variabilidade de localização tem valor zero.

Os seguintes aplicativos de SW utilizam o modelo *Longley-Rice*: CRC-COVWEB, SPLAT!, *Radio Mobile* e *Pathloss 5*. Neste trabalho será utilizado o aplicativo *Radio Mobile* para as comparações com os resultados obtidos em campo.

Modelo ITU-R P.1812-2.

A recomendação ITU-R P.1812-2 - *A path-specific propagation prediction method for point-to-area terrestrial services in the VHF and UHF bands* teve sua última publicação realizada em fevereiro de 2012 e descreve um método de previsão de propagação adequado para serviços terrestres ponto-a-área na faixa de frequência de 30 MHz a 3 GHz.

Este método estima o nível do sinal (intensidade do campo elétrico) que excede determinado valor para uma determinada percentagem $p\%$ de um ano médio, no intervalo de $1\% \leq p \leq 50\%$, e de localização $pL\%$, no intervalo de $1\% \leq pL \leq 99\%$.

O modelo de propagação deste método é simétrico, pois trata ambos os terminais da mesma forma. Do ponto de vista do modelo, não importa qual terminal é o transmissor e qual é o receptor. Contudo, para conveniência na descrição do modelo, o termo "transmissor" e "receptor" é usado para designar os terminais, no início e no fim do percurso, respectivamente.

O método é descrito, em primeiro lugar, em termos do cálculo da perda básica de percurso (dB), que não exceda o valor em p% do tempo, para o valor médio das localizações. Os elementos de variabilidade de local e de perda por penetração em prédios são então caracterizados estatisticamente com respeito aos locais do receptor. Um procedimento é então executado para converter a intensidade do campo elétrico recebido (dB (mV / m)), para a potência transmitida de referência de 1 kW (e.r.p.).

O método é adequado para previsões de cobertura para sistemas de radiocomunicação utilizando circuitos terrestres que têm comprimentos de enlace de 0,25 km até cerca de 3 000 km, com ambos os terminais com antenas até 3 km de altura acima do nível do solo. Não é adequado para previsões de propagação Terra-Ar ou enlaces Terra-Espaço.

O método é específico para cada percurso e depende de sua topografia. As previsões ponto-a-área consistem em uma série de predições ponto-a-ponto, distribuídas uniformemente sobre a área de serviço. O número de pontos deve ser suficientemente grande para garantir que os valores previstos de perda de percurso, assim obtidos, sejam estimativas razoáveis dos valores médios, no que diz respeito aos locais das estações.

Dessa forma, a aplicação do modelo demanda o uso de perfis de terreno detalhados, como funções da distância ao longo do percurso entre os terminais (curvas geodésicas). Para a maioria das aplicações práticas do presente método, para a cobertura ponto-área e previsões de interferência, este pressuposto implica na existência de uma base de dados digital de elevação do terreno, referenciada à latitude e longitude, com respeito a um ponto de referência geodésico consistente, a partir dos quais os perfis de terreno podem ser extraídos por meios automáticos.

A variabilidade de local e a perda por penetração em prédios do modelo são elementos caracterizados por meio de distribuições estatísticas log-normais em relação aos locais do receptor. Embora esta caracterização estatística da propagação ponto-área pareça

tornar o modelo geral assimétrico, deve-se notar que a variabilidade de localização poderia, em princípio, ser aplicada em ambas as extremidades do caminho, ou até mesmo às duas. No entanto, a correção da variabilidade de local só faz sentido em situações em que o local exato de um dado terminal é desconhecido e uma representação estatística sobre possíveis locais do terminal é necessária. Não é provável que isto possa ser aplicado de forma significativa para a localização do transmissor.

Este método de previsão de propagação leva em conta os seguintes elementos do modelo:

- Propagação em Linha de Visada (*Line-of-sight* - LoS)
- Difração (terreno liso e irregular suave)
- Dispersão troposférica
- Propagação anômala (dutos, reflexão em camadas superiores, refração)
- Variação de ganho com a altura do “clutter”
- Variabilidade de local
- Perdas por penetração em edifícios.

1.3 - CAMPANHA DE MEDIDAS.

As questões sistêmicas apresentadas neste capítulo foram organizadas no planejamento de dois testes de campo, o primeiro chamado de Ensaio Móvel e o segundo de Ensaio Fixo. Essa separação teve por objetivo adequar os ensaios e respectivas medições ao conjunto de equipamentos e metodologia utilizados em cada uma das campanhas.

O Ensaio Móvel foi caracterizado por uma transmissão omnidirecional e recepção realizada continuamente por uma unidade móvel. Esse ensaio teve por objetivo principal a medição das condições de cobertura de área em um raio de cerca de 100 km no entorno do ponto de transmissão. Adicionalmente foram realizadas caracterizações pontuais de despolarização da frente de onda, densidade de ruído impulsivo em regiões urbanas e desvanecimento seletivo por multipercurso.

O Ensaio Fixo foi caracterizado por transmissão e recepção diretas, configurando cinco enlaces ponto-a-ponto, simulando a operação prevista para o sistema de rádio acesso

a ser implantado. Além das medições de perda de percurso, foram feitas avaliações detalhadas da variabilidade dos valores de perda de percurso em função da altura da antena do Terminal e da polarização das antenas (vertical ou horizontal). Também foi avaliada a capacidade de discriminação de polarização do sistema irradiante em função da distância do enlace e da altura da antena do Terminal.

O conjunto de resultados obtidos através dos dois ensaios permitiu responder às questões sistêmicas levantadas e estabelecer parâmetros de validação perante os dois modelos de predição aqui propostos.

1.4 - ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.

Esta dissertação passa agora a detalhar o trabalho realizado da seguinte forma:

- Capítulo 2 – Desenvolvimento do Ensaio.
- Capítulo 3 – Resultados.
- Capítulo 4 – Análise dos Modelos de Propagação.
- Capítulo 5 - Comparação dos Resultados de Predição e de Campo.
- Capítulo 6 – Conclusões e Considerações Finais.

CAPÍTULO 2 - DESENVOLVIMENTO DO ENSAIO

Neste capítulo são apresentadas as configurações e especificações dos ensaios realizados em campo. Foram realizados dois ensaios: O primeiro, denominado Ensaio Móvel, teve por objetivo principal, dentre outras avaliações, a caracterização da perda de percurso. O segundo, denominado Ensaio Fixo, teve por objetivo principal caracterizar as condições de enlace nas condições operacionais previstas para o sistema, ou seja, em enlaces ponto-a-ponto entre estações fixas.

2.1 - ENSAIO MÓVEL (PONTO-ÁREA)

O Ensaio Móvel teve por objetivo a avaliação:

- Do desvanecimento seletivo.
- Do desvanecimento por despolarização.
- Da intensidade e distribuição do ruído impulsivo.
- Da perda de percurso em função da topografia e da morfologia.

Para a realização do Ensaio Móvel foram construídas duas estações, abaixo descritas, uma estação denominada Ponto de Transmissão e outra denominada Unidade Móvel.

2.1.1 - Descrição do Ponto de Transmissão

O Ponto de Transmissão foi instalado em uma torre de 35 m de altura, integrante das facilidades do campus da Fundação CPqD, em Campinas - SP. A Figura 1 apresenta o diagrama do Ponto de Transmissão.

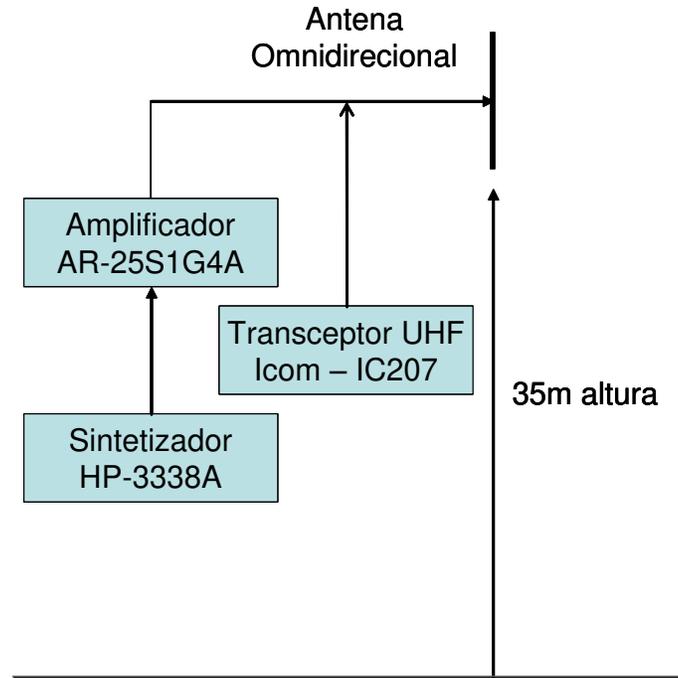


Figura 1 - Diagrama do Ponto de Transmissão.

Os primeiros ensaios foram realizados com o conjunto Sintetizador HP-3338A e Amplificador AR-25S1G4A. Esse conjunto entregou em sua saída a potência de 7,5 W (+38,7 dBm). Contudo, a maioria dos testes foi realizada com o transceptor ICOM IC-207, que disponibilizou a potência de 40 W (+46 dBm). A utilização de maior potência no Ponto de Transmissão permitiu uma faixa dinâmica 7,3 dB maior para as medições. A antena Omnidirecional utilizada no Ponto de Transmissão é o modelo BA-6200 da empresa Nagoya. O fabricante especifica o ganho de 11,15 dBi para essa antena. Essa característica foi validada em um enlace de 5,3 km, contra um dipolo de referência (2,15 dBi), apresentando um ganho de 9 dBd, ou seja, 11,15 dBi conforme especificado. A perda por retorno dessa antena foi caracterizada no local de instalação com o auxílio de um acoplador direcional e está apresentada na Figura 2. A perda por retorno apresentou-se melhor que -15 dB em toda a faixa utilizada para as medições de desvanecimento seletivo (434 MHz a 439 MHz) e melhor que -30 dB na frequência utilizada para as medições de perda de percurso (438,5 MHz).

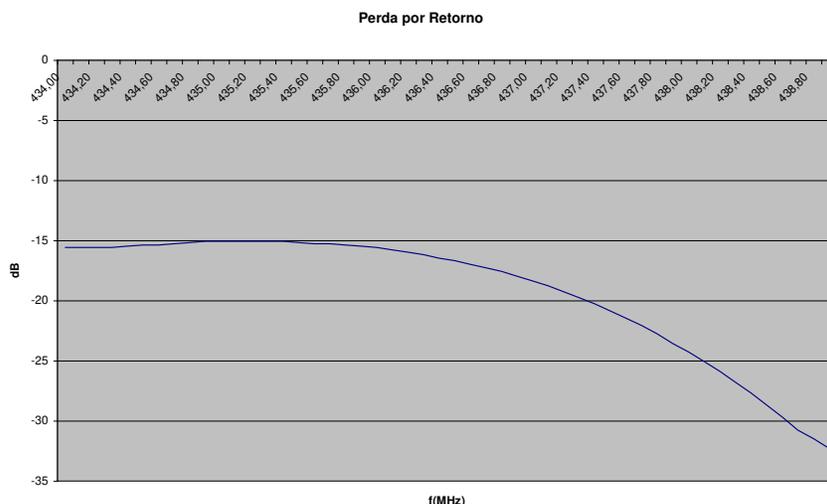


Figura 2 - Perda por Retorno da antena instalada no Ponto de Transmissão.

A potência de transmissão entregue pelo transceptor IC-207, utilizado na maior parte dos ensaios, foi de 40,44 W (+ 46,07 dBm) com variação de +/- 0,05 dB nos extremos da faixa utilizada. Essa variação é suficientemente pequena para ser desconsiderada nos valores medidos de desvanecimento seletivo.

A frequência de 438,5 MHz foi escolhida para as medições de atenuação de enlace e a faixa de 434 a 439 MHz (BW = 5MHz) para as medições de desvanecimento seletivo, pela disponibilidade de antena omnidirecional nessa faixa de frequências, uma vez que a diferença entre a frequência objetivo (460 MHz) e a frequência utilizada (438,5 MHz) é menor que 5%, o que permitiu o aproveitamento dos resultados.

2.1.2 - Descrição da Unidade Móvel

A unidade móvel foi equipada com equipamentos para recepção do sinal, localização geográfica e registro. A Figura 3 apresenta o diagrama da Unidade Móvel. O transceptor Yaesu FT-857D foi utilizado na recepção dos sinais. Esse equipamento disponibiliza uma interface serial com protocolo de comunicação adequado para seu controle e transferência de dados. O receptor foi calibrado em laboratório de tal forma que as informações coletadas na interface serial correspondam a valores definidos em dBm,

conforme apresentado na Tabela 1. Todas as medições foram realizadas no modo de demodulação de Amplitude Modulada (AM), que utiliza filtro de FI (Frequência Intermediária) de aproximadamente 6 kHz de largura. As medições de intensidade de sinal foram realizadas com processamento em FI que atenua substancialmente o ruído impulsivo, enquanto que as medições de ruído foram realizadas em frequência suficientemente diferente daquela onde estava o sinal do Ponto de Transmissão e com o processamento para atenuação do ruído desligado. A Figura 4 mostra o Fator de Forma aproximado do filtro de FI a partir de medições realizadas em laboratório.

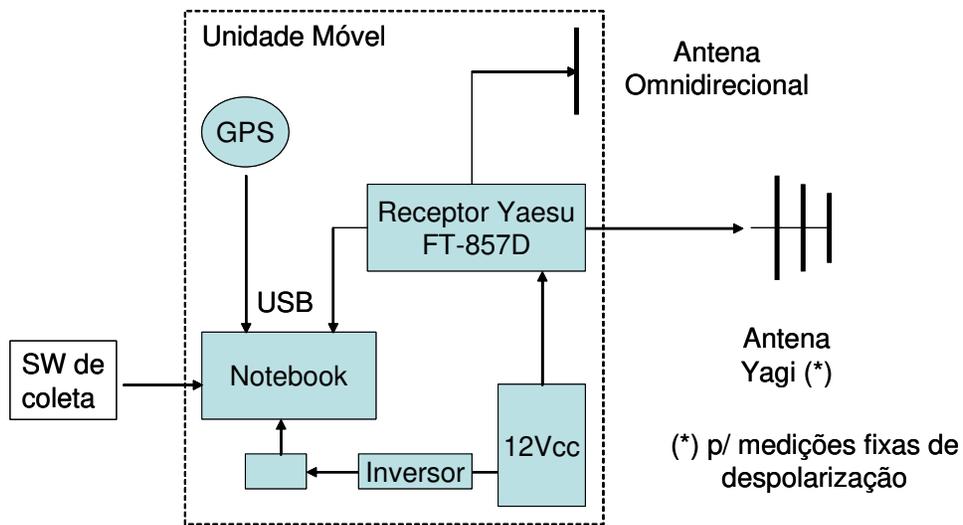


Figura 3 - Diagrama da Unidade Móvel.

Tabela 1 - Calibração do sinal de recepção do FT-857D.

Byte	Prx (dBm)	Byte	Prx (dBm)
0 0 0 0	-110,0	1 0 0 0	-96,8
0 0 0 1	-107,8	1 0 0 1	-88,0
0 0 1 0	-107,3	1 0 1 0	-80,0
0 0 1 1	-106,9	1 0 1 1	-71,4
0 1 0 0	-106,3	1 1 0 0	-61,9
0 1 0 1	-105,4	1 1 0 1	-50,4
0 1 1 0	-104,2	1 1 1 0	-32,4
0 1 1 1	-101,8	1 1 1 1	-30,0

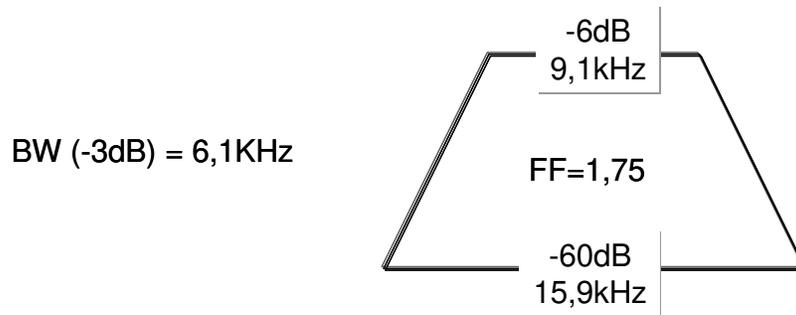


Figura 4 - Fator de Forma do filtro de FI do FT-857D.

A Figura 5 mostra o receptor GPS ME-2000RW, utilizado na Unidade Móvel para registro das coordenadas geográficas, altitude e horário do registro de sinal.



Figura 5 - Receptor GPS ME-2000RW com base magnética, para uso veicular.

Um Notebook foi utilizado para hospedar o programa (SW) de controle e registro de dados através de duas portas USB (seriais). Esse Notebook foi alimentado por um conversor DC/AC durante o período de ensaio. O SW de controle executou, a cada ciclo de um segundo, as seguintes tarefas:

- Leitura dos dados do GPS (longitude, latitude, altitude e hora).
- Verificação de *Checksum* para garantir os dados obtidos do GPS.
- Leitura do nível de sinal recebido pelo receptor.
- Registro dos dados em arquivo CSV.

A Figura 6 apresenta a tela oferecida para operação do SW de controle.

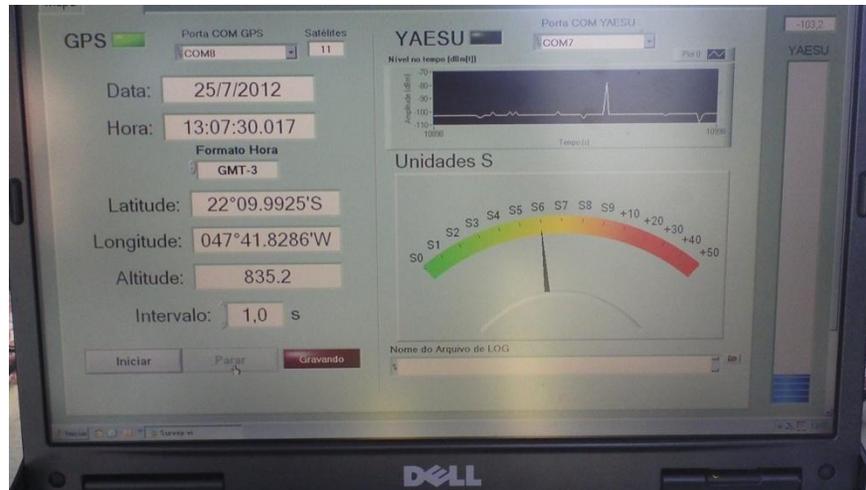


Figura 6 - Tela de operação do SW de controle.

A antena de recepção utilizada durante a operação móvel foi uma Omnidirecional com 6 dBi de ganho. Foi considerado o ganho total de recepção de 5 dBi, pois a perda no cabo e conector, entre a antena e o receptor, foi estimada em 1 dB. Uma antena Yagi de três elementos foi construída, associada a uma escala em graus (transferidor) e "fio de prumo". Essa antena foi utilizada esporadicamente, em posições remotas, para avaliação da polarização do sinal recebido (desvanecimento por despolarização) e é apresentada na Figura 7.

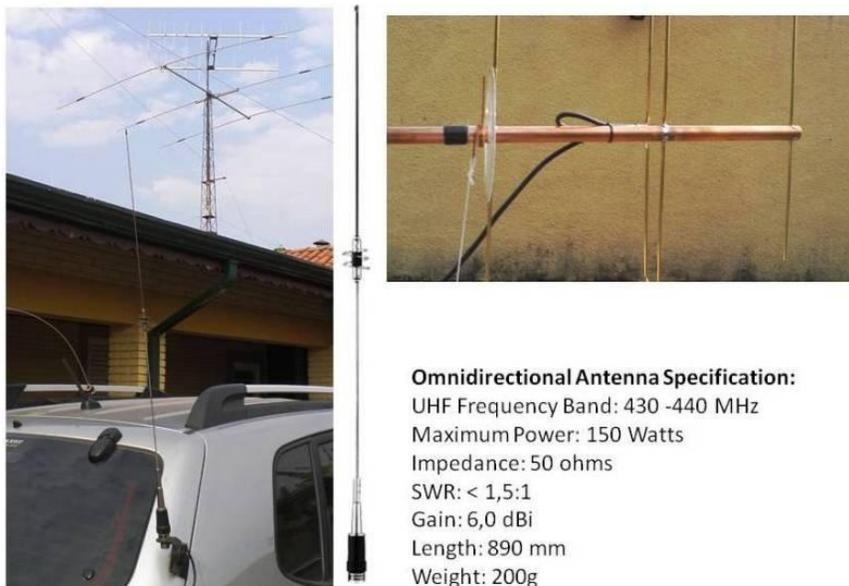


Figura 7 - Antenas utilizadas na Unidade Móvel.

2.1.3 - Planejamento das Rotas para o Ensaio Móvel

O planejamento das rotas do Ensaio Móvel precedeu as medições em campo e teve por objetivo otimizar o esforço empreendido nessas medições, além de permitir algumas simulações que disponibilizaram informações e expectativas de resultados para validação dos procedimentos.

Por ser uma aplicação de acesso livre e por estar disponível para *download* [7] e instalação, foi utilizado o programa *Radio Mobile* para as simulações preliminares do Ensaio Móvel. Para tal, foram reproduzidas, nesse aplicativo, as condições de operação do Ponto de Transmissão e da Unidade Móvel. Com essas informações foi então possível obter uma simulação de cobertura e expectativa de níveis de sinal recebidos ao redor do Ponto de Transmissão, descrito anteriormente. A Figura 8 apresenta o resultado dessa simulação, considerando a parametrização estatística *default* para o modelo ITM – *Irregular Terrain Model* (Longley-Rice), implementado pelo aplicativo *Radio Mobile*.

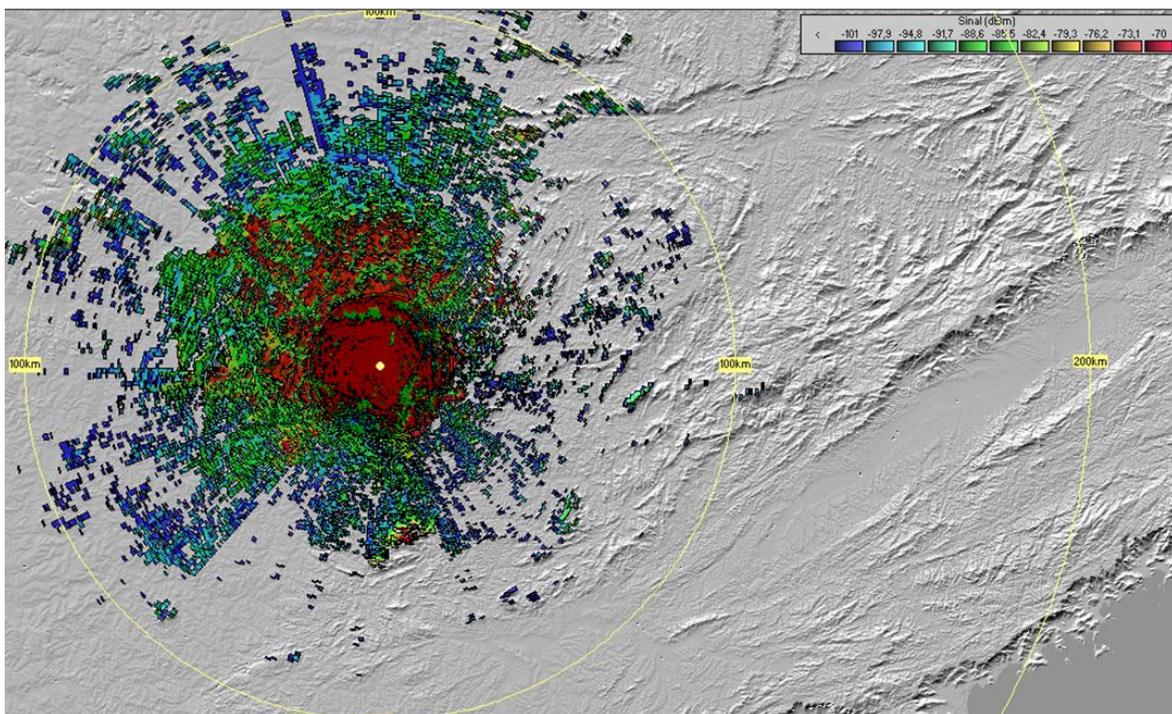


Figura 8 – Simulação de cobertura realizada pelo Radio Mobile.

cada registro, a partir das coordenadas geográficas. A Tabela 3 mostra um exemplo do arquivo pós-processado.

Tabela 2 – Exemplo de formato do arquivo de coleta de dados (CSV).

Formato	Data	Hora	Longitude	Latitude	Altitude	Unidade S	RSSI (dBm)
GMT-3	25/07/2012	10:22:21.005	047°03.9375'W	22°50.5901'S	625.5	8	-94,7
GMT-3	25/07/2012	10:22:22.005	047°03.9375'W	22°50.5901'S	625.7	8	-94,7
GMT-3	25/07/2012	10:22:23.005	047°03.9375'W	22°50.5901'S	625.9	8	-94,7
GMT-3	25/07/2012	10:22:24.005	047°03.9374'W	22°50.5901'S	626.1	8	-94,7
GMT-3	25/07/2012	10:22:25.005	047°03.9374'W	22°50.5901'S	626.2	8	-94,7
GMT-3	25/07/2012	10:22:26.005	047°03.9374'W	22°50.5901'S	626.3	8	-94,7
GMT-3	25/07/2012	10:22:27.005	047°03.9373'W	22°50.5901'S	626.4	8	-94,7
GMT-3	25/07/2012	10:22:28.005	047°03.9373'W	22°50.5900'S	626.5	8	-94,7
GMT-3	25/07/2012	10:22:29.005	047°03.9373'W	22°50.5900'S	626.6	8	-94,7
GMT-3	25/07/2012	10:22:30.005	047°03.9373'W	22°50.5900'S	626.7	8	-94,7
GMT-3	25/07/2012	10:22:31.005	047°03.9372'W	22°50.5900'S	626.8	8	-94,7
GMT-3	25/07/2012	10:22:32.005	047°03.9372'W	22°50.5901'S	626.9	8	-94,7
GMT-3	25/07/2012	10:22:33.005	047°03.9372'W	22°50.5901'S	627.0	8	-94,7

Tabela 3 – Exemplo de formato do arquivo de coleta de dados pós-processado.

(dBm) RSSI	Posição do TX		Posição do Rx		Arco BC (a)	Arco AB (c)	Arco AC (b)	X Km
	Longitude Graus	Latitude Graus	Longitude Graus	Latitude Graus				
-94,7	-47,0470800000	-22,817222200	-47,06562500	-22,843168333	0,0185450	112,8172222	112,84316833	3,45
-94,7	-47,0470800000	-22,817222200	-47,06562500	-22,843168333	0,0185450	112,8172222	112,84316833	3,45
-94,7	-47,0470800000	-22,817222200	-47,06562500	-22,843168333	0,0185450	112,8172222	112,84316833	3,45
-94,7	-47,0470800000	-22,817222200	-47,06562333	-22,843168333	0,0185433	112,8172222	112,84316833	3,45
-94,7	-47,0470800000	-22,817222200	-47,06562333	-22,843168333	0,0185433	112,8172222	112,84316833	3,45
-94,7	-47,0470800000	-22,817222200	-47,06562333	-22,843168333	0,0185433	112,8172222	112,84316833	3,45
-94,7	-47,0470800000	-22,817222200	-47,06562167	-22,843168333	0,0185417	112,8172222	112,84316833	3,45
-94,7	-47,0470800000	-22,817222200	-47,06562167	-22,843166667	0,0185417	112,8172222	112,84316667	3,45
-94,7	-47,0470800000	-22,817222200	-47,06562167	-22,843166667	0,0185417	112,8172222	112,84316667	3,45
-94,7	-47,0470800000	-22,817222200	-47,06562167	-22,843166667	0,0185417	112,8172222	112,84316667	3,45
-94,7	-47,0470800000	-22,817222200	-47,06562000	-22,843166667	0,0185400	112,8172222	112,84316667	3,45
-94,7	-47,0470800000	-22,817222200	-47,06562000	-22,843168333	0,0185400	112,8172222	112,84316833	3,45
-94,7	-47,0470800000	-22,817222200	-47,06562000	-22,843168333	0,0185400	112,8172222	112,84316833	3,45

Em cada arquivo pós-processado foi acrescentado um registro associando os dados coletados às características da radial onde e quando foram realizadas as medições. A Tabela 4 mostra esse registro.

Tabela 4 - Exemplo de registro associado aos dados coletados na Radial R1B.

ROTA	1	
Segmento	B	
Data	25/07/2012	
Hora de Início	11:00:14.008	GMT-3
Hora de Término	11:26:10.010	GMT-3
Altitude Mínima	512,80	m
Altitude Máxima	635,00	m
Altitude Média	588,74	m
Desvio Padrão	27,91	m
Início: Rod. Anhanguera // Px Pedágio Americana		
Término: Início Rod. Washignton Luiz		

2.2 - ENSAIO FIXO (PONTO-MULTIPONTO)

O Ensaio Fixo teve por objetivo a avaliação das seguintes características de enlace:

- Perda de percurso entre pontos fixos.
- Variação na perda de percurso em função da altura da antena do Terminal.
- Eventuais diferenças na perda de percurso quando a polarização das antenas é vertical ou horizontal.
- Discriminação de polarização (*Cross-Pol*) no Ponto de Recepção.

2.2.1 - Descrição do Ponto de Transmissão

Ponto de Transmissão para o Ensaio Fixo foi constituído de um transmissor, o mesmo IC-207 utilizado no Ensaio Móvel, disponibilizando 40 W (+46 dBm) a duas antenas Yagi de sete elementos, uma na polarização vertical e outra na polarização horizontal, selecionadas por uma chave de antenas¹.

O diagrama do Ponto de Transmissão para o Ensaio Fixo está apresentado na Figura 10.

¹ Na Figura 10 – IL – *Insertion Loss*, RL – *Return Loss* e Isol – Isolação entre portas.

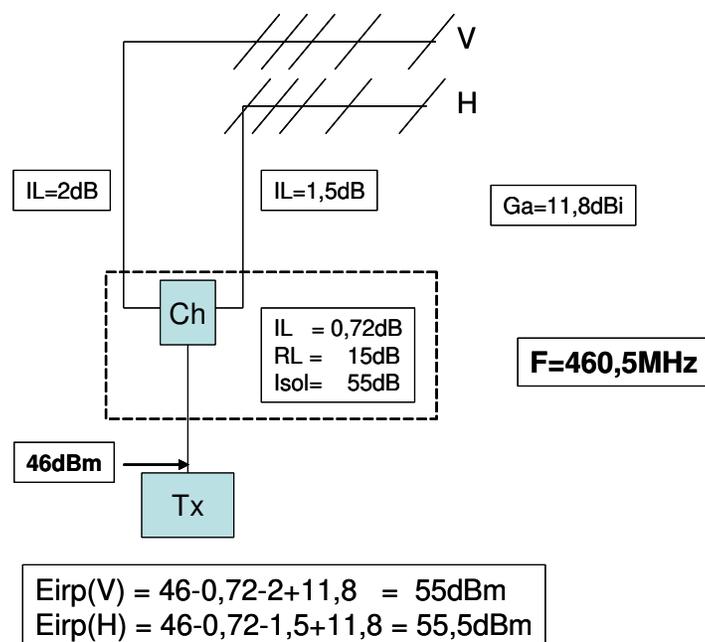


Figura 10 - Diagrama do Ponto de Transmissão para o Ensaio Fixo.

O modelo das antenas é Y46011-07SG, da TSM Telecomunicações do Brasil Ltda, com 11,8 dBi de ganho (informação do fabricante). Para o Ensaio Fixo foi utilizada a frequência de 460,5 MHz, central à faixa de interesse, em função da disponibilidade de antenas diretivas para o ensaio. As antenas foram instaladas nas polarizações horizontal e vertical, com azimute de 010° , conforme mostra a Figura 11.



Figura 11 - Antenas Yagi H/V no Ponto de Transmissão.

2.2.2 - Descrição da Unidade Remota

A Unidade Remota tem seu diagrama mostrado na Figura 12. A mesma antena Yagi, modelo Y46011-07SG, foi utilizada nesse Ponto de Recepção. Essa antena foi instalada no topo de um mastro pneumático capaz de atingir alturas superiores a 10 metros. Durante o procedimento de ensaio essa antena foi instalada na polarização vertical e horizontal, alternadamente. O equipamento utilizado para a medição da intensidade do sinal recebido foi um Analisador de Espectro modelo FSH-8 da Rohde & Schwarz. A Figura 13 mostra a Unidade Móvel instalada durante uma das medições de sinal.

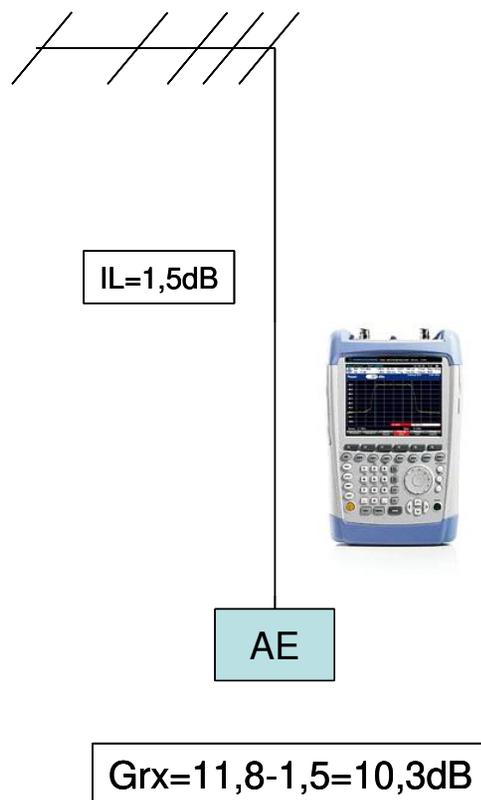


Figura 12 - Unidade Remota utilizada no Ensaio Fixo.



Figura 13 - Unidade Móvel em um dos pontos de medição.

2.2.3 - Planejamento dos pontos de medida para o Ensaio Fixo

O planejamento das rotas do Ensaio Fixo precedeu as medições em campo e teve por objetivo permitir algumas simulações que disponibilizaram informações e expectativas de resultados para validação dos procedimentos.

A Rota 1, em sua Radial Norte, foi escolhida para a realização do ensaio por apresentar morfologia rasteira sobre uma topografia suave, além de apresentar condições de logística adequadas. As informações de perda de percurso na Radial Norte, medidas no Ensaio Móvel, foram consideradas para o pré-posicionamento dos pontos fixos de medição remota. Como verificado no Ensaio Móvel, sinais úteis foram recebidos nesta radial até 40 km a partir do Ponto de Transmissão. Foi então realizada visita técnica ao trecho proposto, com avaliação constante do nível de sinal recebido por uma unidade móvel, composta por uma antena omnidirecional veicular conectada ao Analisador de Espectro FSH-8. Foram encontrados cinco locais que permitiram a instalação da Unidade Remota com possibilidade de obtenção de energia elétrica comercial. A Figura 14 mostra os pontos de medição escolhidos para o Ensaio Fixo em relação à abertura de feixe das antenas Yagi instaladas no Ponto de Transmissão.

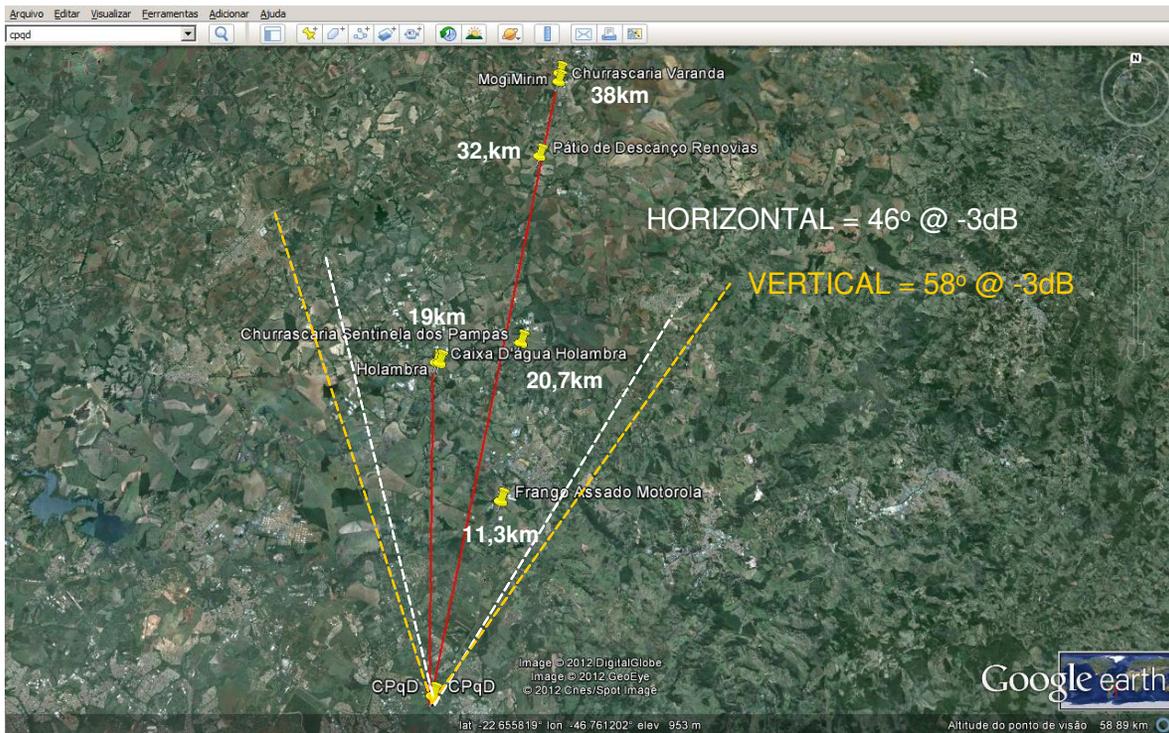


Figura 14 - Pontos de medição escolhidos para o Ensaio Fixo

As características geográficas dos pontos de medição escolhidos estão apresentadas na Tabela 5. Nessa mesma tabela estão apresentados os valores estimados por simulação da atenuação do enlace e do nível de sinal recebido em cada ponto.

Tabela 5 - Pontos de medição para o Ensaio Fixo e valores estimados de sinal e atenuação de enlace.

	IDA			VOLTA		CPqD	Unidade
	FrangoAssado	Ch-Sentinela	Ch-Varanda	Renovias	Holambra		
Latitude GPS	22o 43,254S	22o 38,137S	22o 28,821S	22o 31,147S	22o 38,792S		Graus
Latitude GE	-22,720588	-22,635541	-22,48035	-22,526433	-22,646533	-22,817188	Graus
Longitude GPS	47o 00,772O	47o 00,172O	46o 58,926O	46o 59,454O	47o 02,984O		Graus
Longitude GE	-47,012823	-47,002864	-46,9821	-46,993367	-47,049733	-47,047095	Graus
Distância	11,3	20,7	38,0	32,8	19,0	0,0	km
Azimute	18,12	12,67	10,11	9,69	359,18		Graus
Altitude (GPS)	606,0	640,0	700,0	658,0	632,0		m
Altitude (GE)	610,0	639,0	712,0	658,0	627,0	657,0	m
Altitude (RM)	612,8	638,8	712,0	661,0	624,1	653,0	m
Atenuação - 2m	125,7	121,3	129,6	129,6	123,9		dB
Atenuação - 4m	125,4	121,1	126,4	129,2	123,5		dB
Atenuação - 6m	125,1	121,0	126,1	128,9	123,0		dB
Atenuação - 8m	124,7	120,8	125,8	128,5	122,6		dB
Atenuação - 10m	124,4	120,6	125,6	128,2	122,2		dB
Sinal - 2m	-61,3	-56,1	-64,0	-64,1	-59,9		dBm
Sinal - 4m	-61,0	-55,9	-60,8	-63,7	-59,5		dBm
Sinal - 6m	-60,6	-55,8	-60,5	-63,4	-59,1		dBm
Sinal - 8m	-60,3	-55,6	-60,2	-63,0	-58,6		dBm
Sinal - 10m	-60,0	-55,4	-60,0	-62,7	-58,2		dBm

GE = Google Earth
RM = Radio Mobile

Atenuação média = 124,9 dB
Nível médio de Rx = -60 dBm

2.3 - DESENVOLVIMENTO DO ENSAIO – CONCLUSÕES

Neste capítulo foram apresentadas as principais características da estrutura e metodologia aplicadas ao ensaio móvel e ao ensaio fixo, além de seus respectivos planejamentos. Os resultados apresentados a seguir, no Capítulo 3, demonstram que os ensaios de campo foram estruturados e planejados adequadamente para os objetivos a que se propunham.

CAPÍTULO 3 - RESULTADOS DOS TESTES EM CAMPO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos durante os dois ensaios de campo, o Ensaio Fixo e o Ensaio Móvel. A partir desses resultados é possível estabelecer algumas conclusões parciais a respeito das questões sistêmicas propostas no início do trabalho e descritas a seguir.

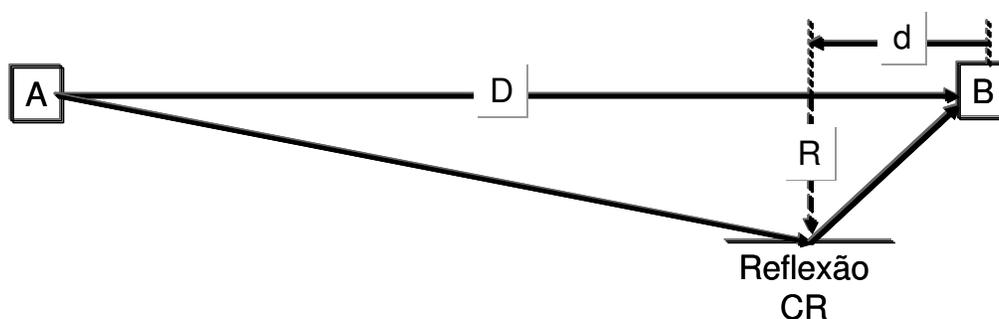
3.1 - DESVANECIMENTO SELETIVO

A medição de desvanecimento seletivo tem dois objetivos:

- A avaliação da amplitude do desvanecimento seletivo dentro de um canal de 5 MHz de largura. Essa avaliação permite estimar a eficácia esperada do equalizador em banda base de um sistema com multiportadoras ortogonais (OFDM), técnica utilizada no sistema LTE.
- A avaliação da característica de multipercorso do enlace, que impacta na aplicação das técnicas de MIMO (*Multiple Input - Multiple Output*).

A avaliação da característica de multipercorso pode ser feita através da assinatura do desvanecimento seletivo do enlace. O modelo de dois raios descrito na Figura 15 serve como referencia para a obtenção da assinatura de multipercorso em função das características dos dispersores próximos, tais como distância do Ponto de Recepção (d), distância do eixo longitudinal do enlace (R) e coeficiente de reflexão (CR).

Este é um modelo de apenas dois percursos, com um sinal principal e um sinal refletido em um ponto de reflexão próximo ao ponto de recepção, mas é um modelo que permite a caracterização do mecanismo multipercorso de um enlace rádio.



Modelo de dois raios

Figura 15 - Modelo de referência multipercurso de dois raios.

As Figuras 16 a 19 mostram quatro simulações, realizadas com uma planilha Excel, de situações relativas ao Ponto de Recepção e um ponto próximo de reflexão do segundo raio, segundo o modelo da Figura 15. Essas simulações consideraram um canal de 5 MHz de largura, entre 434 MHz e 439 MHz, frequências posteriormente utilizadas em campo para realização dessas medições.

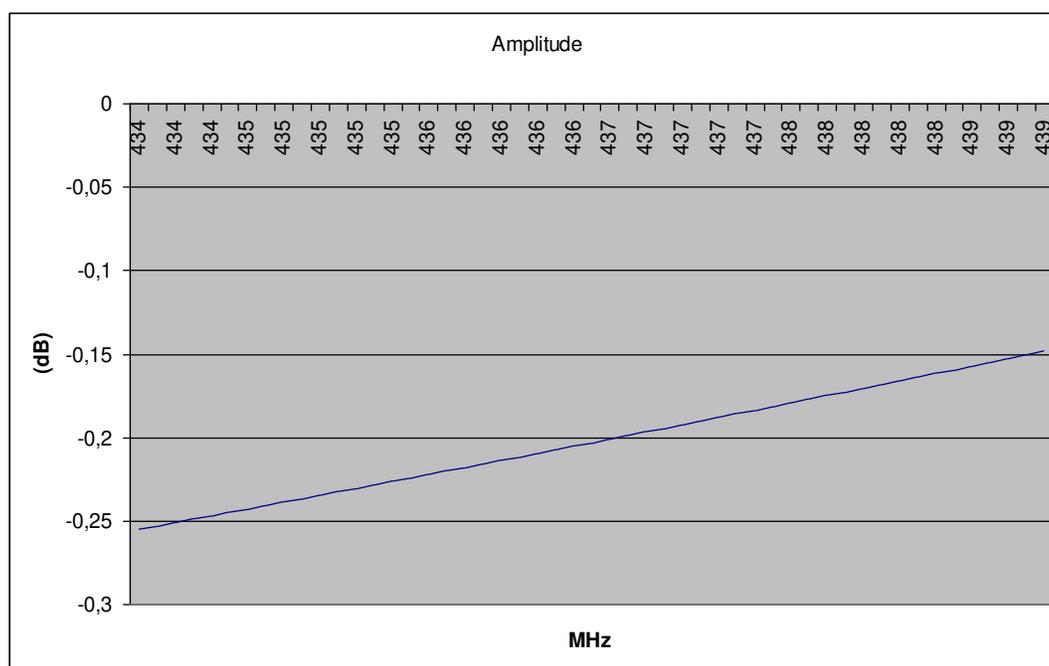


Figura 16 – Assinatura do desvanecimento seletivo para reflexão de 10% a 500m do receptor e 50m fora do eixo do enlace.

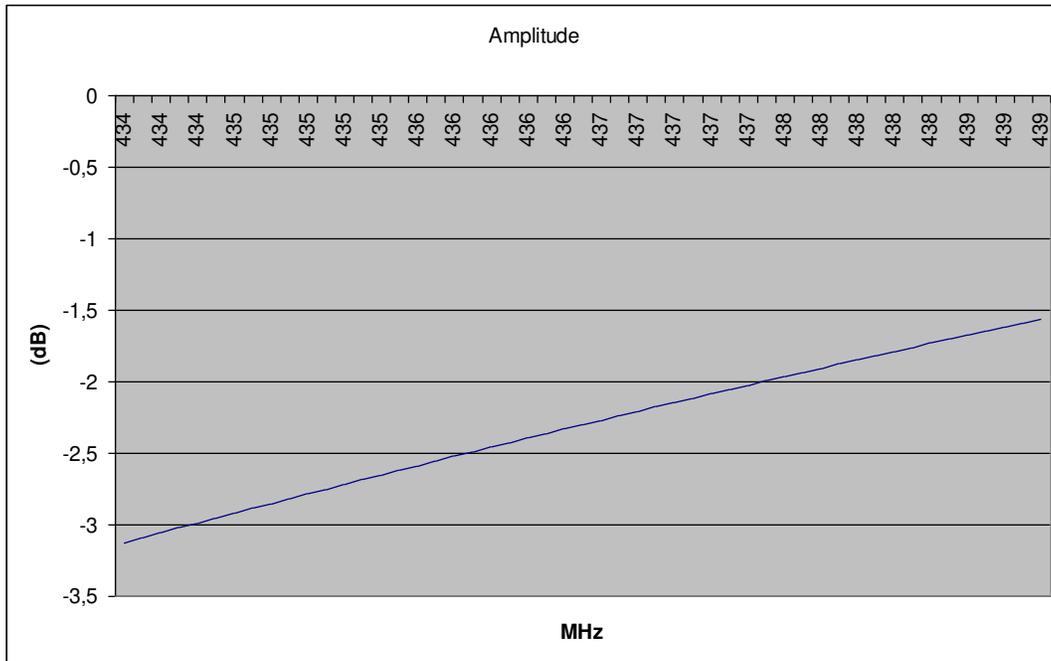


Figura 17 - Assinatura do desvanecimento seletivo para reflexão de 90% a 500m do receptor e 50m fora do eixo do enlace.

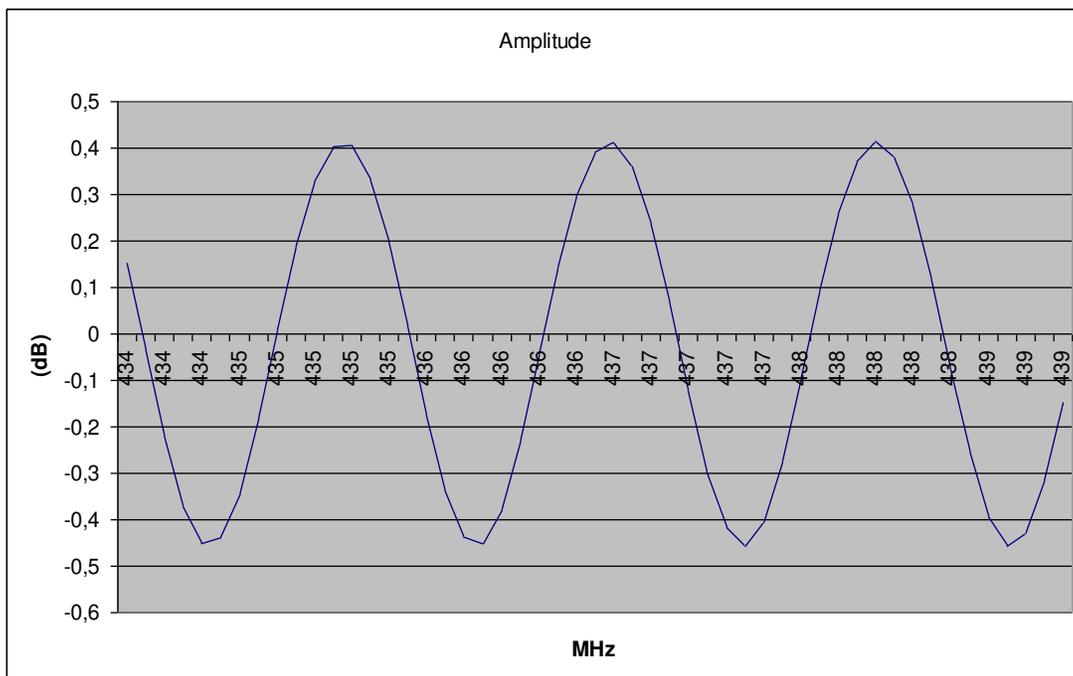


Figura 18 - Assinatura do desvanecimento seletivo para reflexão de 10% a 500m do receptor e 500m fora do eixo do enlace.

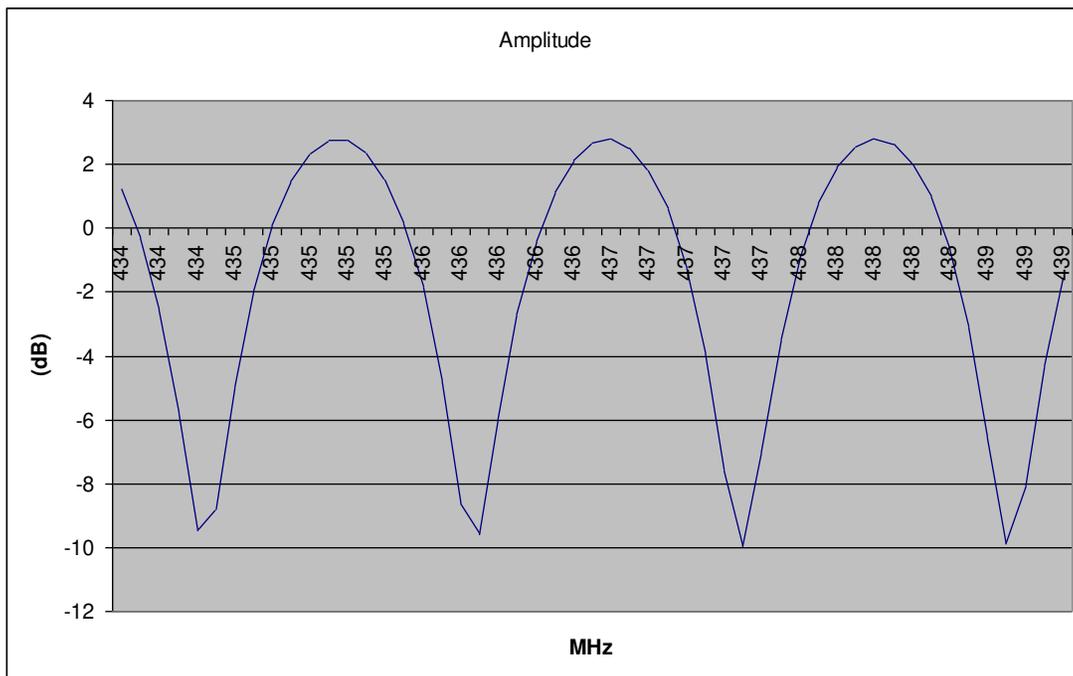


Figura 19 - Assinatura do desvanecimento seletivo para reflexão de 90% a 500m do receptor e 500m fora do eixo do enlace.

Através dessa simulação é possível notar que:

- Pontos de reflexão próximos ao ponto de recepção, por produzirem um erro de fase pequeno entre os dois raios, apresentam uma assinatura com menos de um ciclo de variação dentro do canal e amplitude pequena, menor que 2 dB p.p., demonstrando pouca sensibilidade ao valor do coeficiente de reflexão.
- Pontos de reflexão distantes do ponto de recepção apresentam uma assinatura com vários ciclos de variação dentro do canal e amplitude consideravelmente sensível em relação ao coeficiente de reflexão, podendo variar desde 1 dB p.p., para CR=10%, até mais de 10 dB p.p. para CR=90%.

Em condições de propagação com múltiplos percursos, causados por reflexões em dispersores aleatoriamente distribuídos quanto à sua localização e coeficientes de

reflexão, espera-se que a assinatura do desvanecimento seletivo também tenha um formato aleatório ao longo do canal. Entretanto, a profundidade do desvanecimento e eventuais periodicidades denotarão o tipo de ambiente multipercurso analisado.

Foram realizadas três medições de desvanecimento seletivo durante o Ensaio Móvel:

- Para um enlace de 10 km, com obstrução severa.
- Para um enlace de 57 km, com obstrução suave.
- Para um enlace de 10 km, com Ponto de Recepção localizado na região urbana.

As Figuras 20 a 22 apresentam os resultados obtidos. É importante ressaltar que a potência de transmissão foi mantida constante ao longo do canal medido com variações menores que $\pm 0,05$ dB. A largura do canal considerado foi de 5 MHz, com frequência central de 436,5 MHz, ou seja, o canal tem largura aproximada de 1% da frequência central.

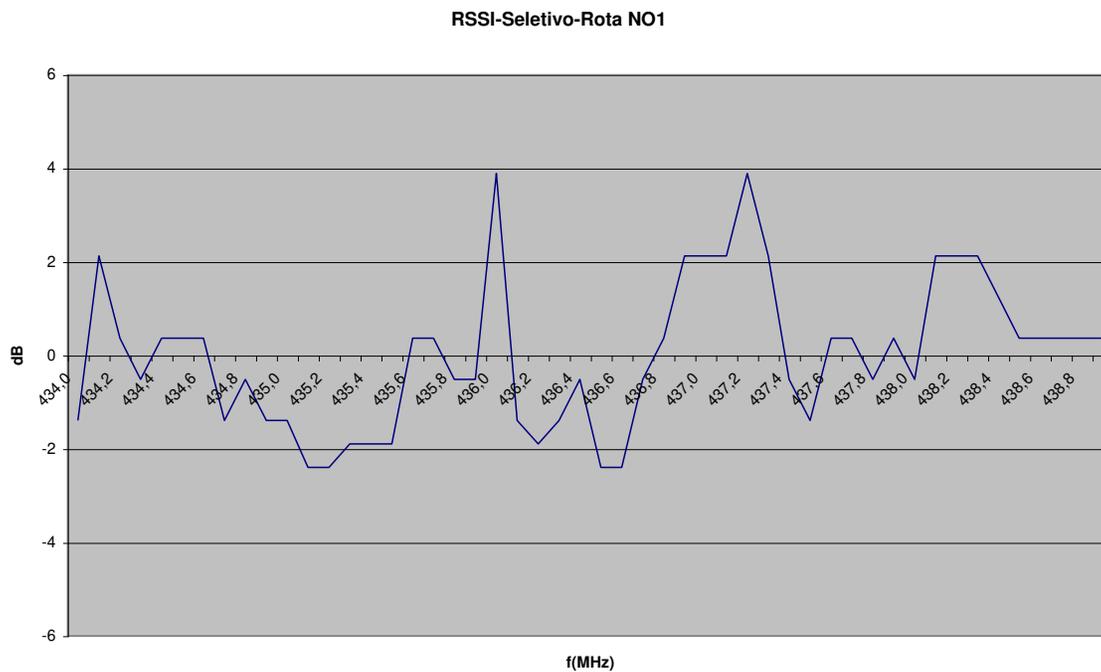


Figura 20 - Desvanecimento seletivo em enlace curto de 10 km com obstrução severa.

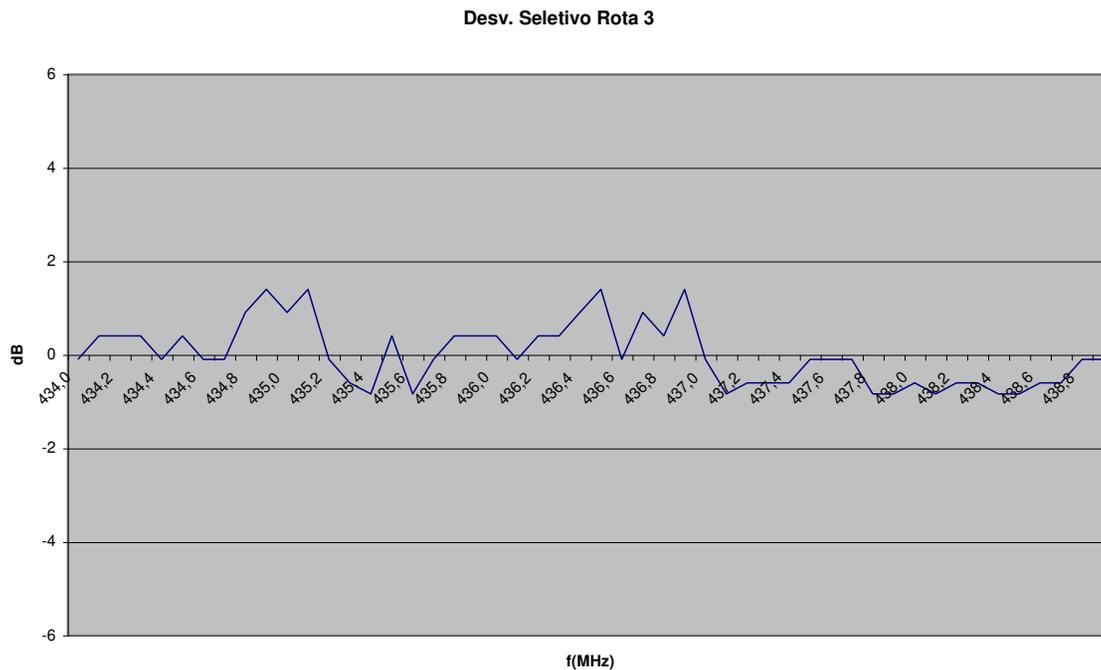


Figura 21 - Desvanecimento seletivo em enlace longo de 57 km com obstrução suave.

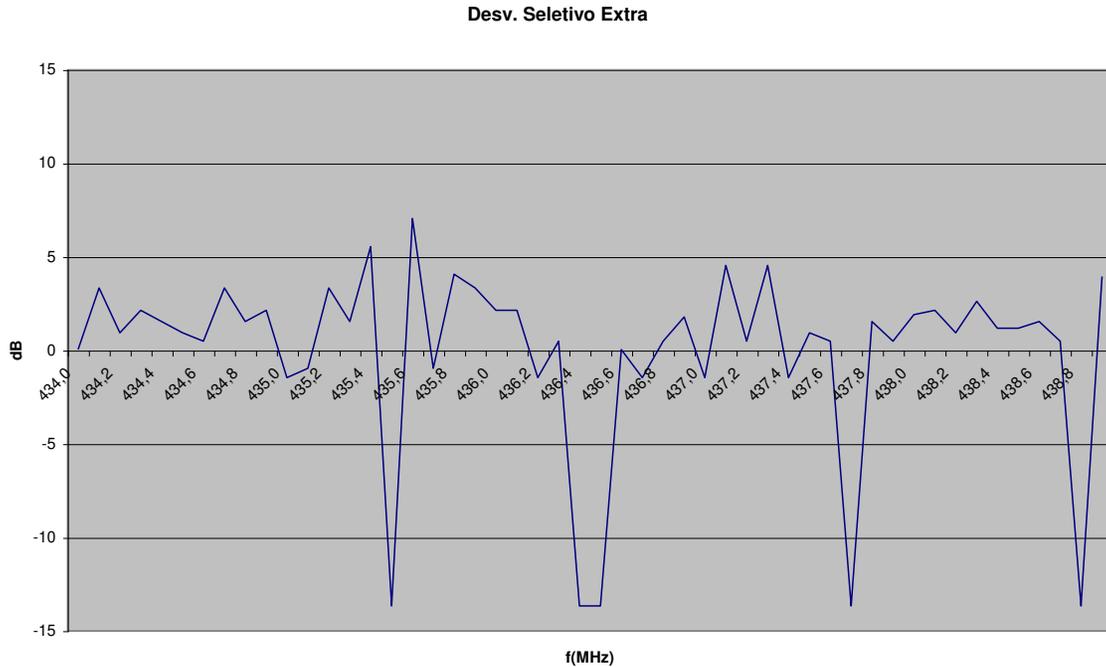


Figura 22 - Desvanecimento seletivo em enlace curto de 10 km em área urbana.

Para o enlace de 10 km com obstrução severa, mostrado na Figura 20, a amplitude do desvanecimento foi da ordem de ± 3 dB, característica de um coeficiente de reflexão médio de 0,5. Apesar disso, a amplitude do desvanecimento e certa periodicidade entre máximos e mínimos denota a preponderância de dispersores não tão próximos do ponto de recepção, como as edificações de baixa altura que rodeavam a Unidade Móvel, conforme mostra a Figura 23. Pode-se dizer que este enlace é caracterizado como um ambiente multipercurso de baixa intensidade com dispersores distribuídos ao longo da rota.

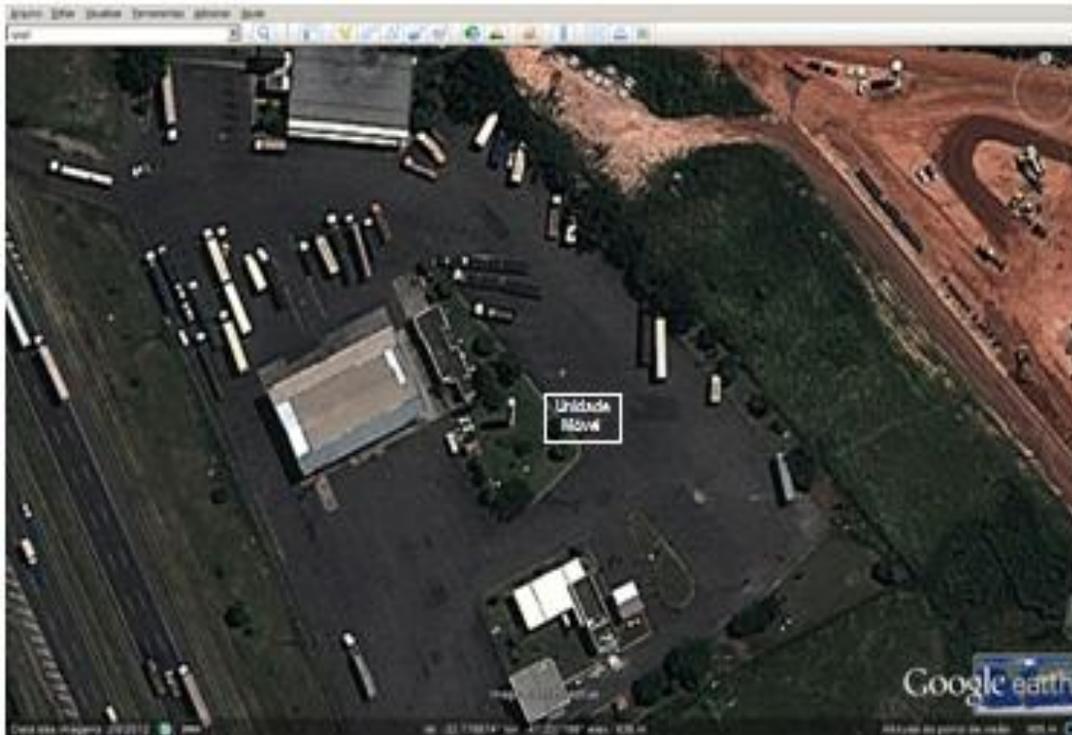


Figura 23 - Posicionamento da Unidade Móvel no enlace de 10 km com obstrução severa e reflexões próximas em edificações e veículos de grande porte.

Para o enlace de 57 km com obstrução suave, mostrado na Figura 21, o desvanecimento foi da ordem de ± 1 dB, característica de um coeficiente de reflexão médio de 0,2. Durante essas medições a Unidade Móvel estava rodeada de vegetação rural distante, como mostra a Figura 24. A amplitude do desvanecimento e alguma periodicidade entre máximos e mínimos denotam um ambiente de propagação com multipercursos de baixa intensidade e dispersores distantes do ponto de recepção.



Figura 24 - Azimute do Ponto de Transmissão, a partir da Unidade Móvel, durante as medições de desvanecimento seletivo no enlace de 57 km.

A Figura 25 apresenta as condições do enlace apresentado na Figura 22. Neste enlace três morfologias estão representadas. A partir do Ponto de Transmissão, aproximadamente 1/3 do enlace ocorre em região rural, o segundo 1/3 em região suburbana e o último 1/3 em região urbana densa. A Unidade Móvel estava localizada dentro da região urbana, a 10 km do Ponto de Transmissão, tendo o aglomerado de prédios da região urbana entre o Ponto de Recepção e o Ponto de Transmissão. Essa situação de enlace foi avaliada apenas para confirmar o ambiente multipercurso urbano na faixa de frequências de 450 a 470 MHz, uma vez que não caracteriza a operação rural pretendida.

Nota-se pela periodicidade do desvanecimento, com vários máximos e mínimos ao longo do canal, que os dispersores importantes tendem a estar a distâncias de algumas centenas de metros do Ponto de Recepção. O desvanecimento ao longo do canal foi da ordem de +7 dB e -14 dB, típico de um coeficiente de reflexão médio de 0,98, característico da reflexão nos prédios próximos ao Ponto de Recepção. Durante essas medições a Unidade Móvel estava rodeada de edificações urbanas, como mostra a Figura 26.

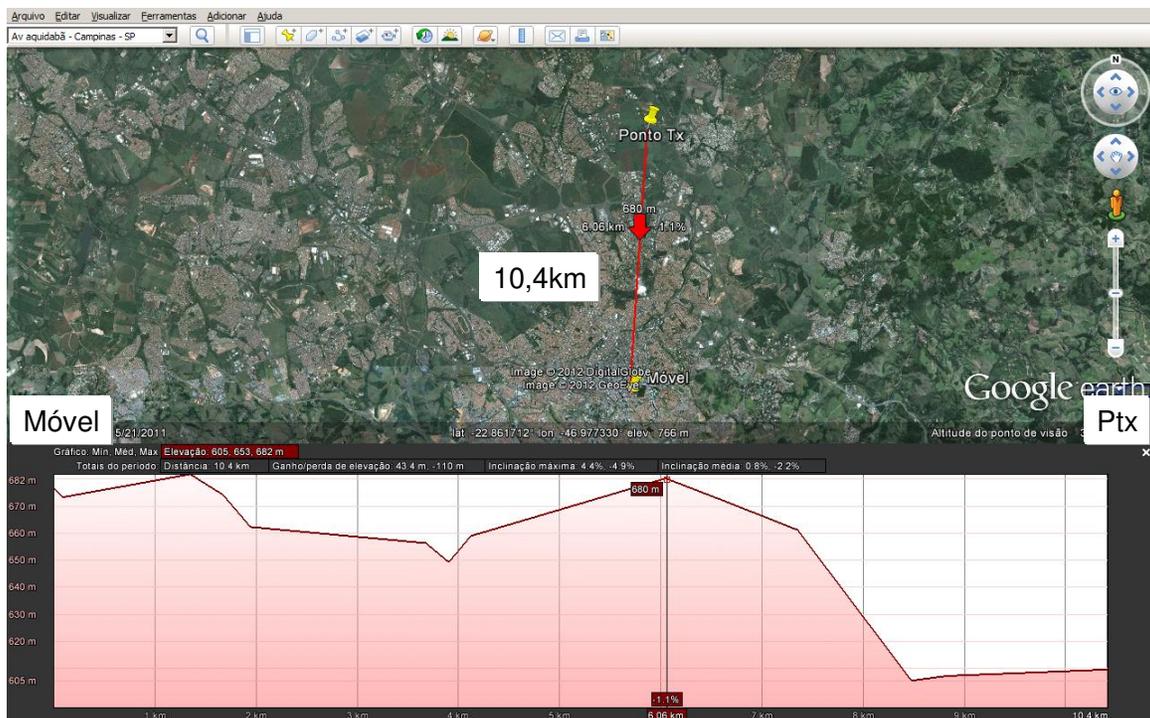


Figura 25 - Enlace curto de 10 km em região urbana.



Figura 26 - Azimute do Ponto de Transmissão, a partir da Unidade Móvel, durante as medições de desvanecimento seletivo no enlace urbano.

A partir dos resultados obtidos é possível inferir, para o ambiente de propagação rural:

- A amplitude do desvanecimento seletivo, à qual o equalizador de canal será submetido, deverá ser menor que ± 3 dB, tipicamente ± 1 dB.
- O ambiente multipercurso em região rural é tipicamente de baixa densidade, podendo inviabilizar a técnica MIMO de multiplexação espacial.

3.2 - POLARIZAÇÃO DA FRENTE DE ONDA

A antena Yagi de três elementos foi utilizada em substituição à antena omnidirecional da Unidade Móvel, para a realização das medições de polarização da frente de onda recebida, em três pontos fixos durante o Ensaio Móvel:

- Para um enlace distante de 100 km, sem obstrução.
- Para um enlace médio de 57 km, com obstrução leve.
- Para um enlace curto de 10 km, com obstrução severa em ambiente urbano.

A Figura 27 mostra o ambiente próximo dos três Pontos de Recepção. No ponto distante não foi verificado nenhum desvio na polarização da frente de onda. O sinal foi recebido exatamente na posição vertical, a cerca de 100 km do Ponto de Transmissão. Já no ponto médio com obstrução suave foi verificado um pequeno desvio na polarização da ordem de 8° . No ambiente urbano, com multipercurso intenso, foram verificados desvios de polarização entre 25° e 35° .

É possível inferir, a partir das três medições realizadas, que os desvios de polarização em ambiente rural não devem ultrapassar o limite de 10° , o que corresponde a um desvanecimento por despolarização desprezível, menor que 0,07 dB. Portanto, não é necessária a utilização de sistemas irradiantes com diversidade de polarização para enlaces na área rural.



Figura 27 - Ambientes de recepção para (a) enlace longo de 100 km sem obstrução próxima, (b) enlace médio de 57 km com obstruções suaves e (c) enlace urbano de 10 km com obstrução severa.

3.3 - RUÍDO IMPULSIVO.

O ruído impulsivo foi avaliado em três situações distintas, em uma região rural à margem de uma rodovia, através de uma cidade de médio porte, na região central de Pirassununga (SP), e através de uma cidade de grande porte, a região central de São Paulo - Capital. As medições foram realizadas nas seguintes condições:

- Em horário comercial, durante o período da tarde.
- No modo de demodulação AM, com filtro de 6 kHz de largura de banda.
- Com o processamento para redução de ruído desligado.

As Figuras 28, 29 e 30 apresentam a distribuição de amplitude das amostras obtidas à margem da Rodovia Fernão Dias, nas proximidades da cidade de Bragança Paulista (SP), e no trajeto cruzando o centro das cidades de Pirassununga e de São Paulo. A taxa de amostragem foi de uma amostra por segundo. As Figuras 31, 32 e 33 apresentam os histogramas desses conjuntos de amostras, com amplitude normalizada pela largura de banda do filtro (dBm/Hz).

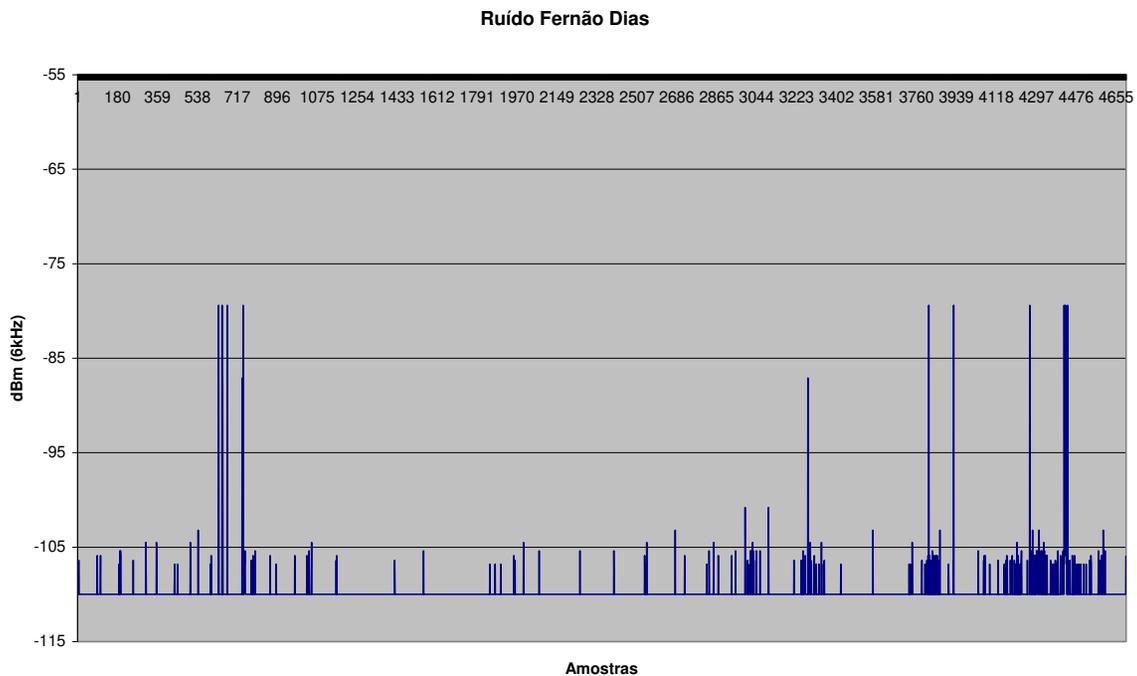


Figura 28 - Amplitude do ruído impulsivo à margem da Rodovia Fernão Dias.

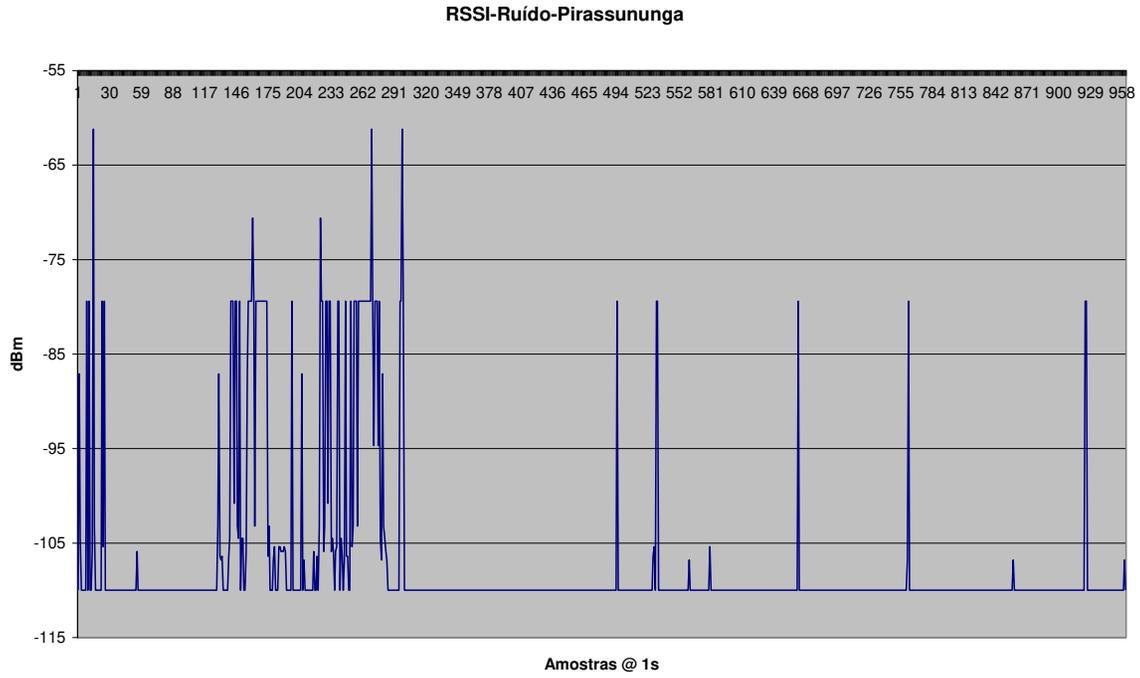


Figura 29 - Amplitude do ruído impulsivo no centro de Pirassununga.

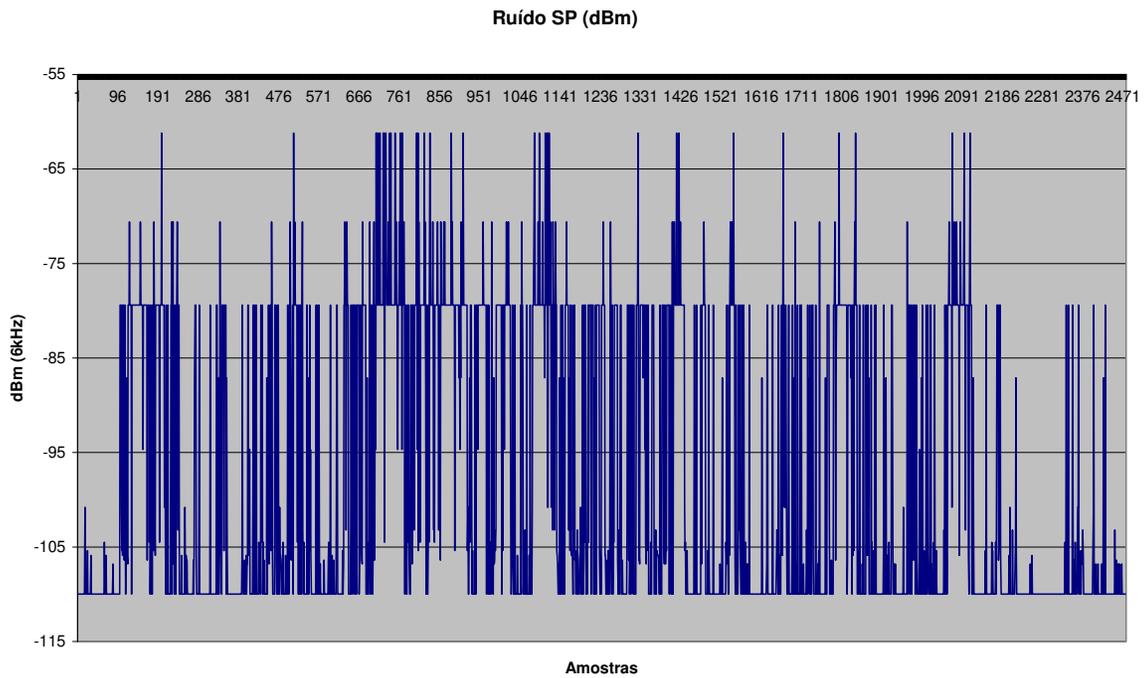


Figura 30 - Amplitude do ruído impulsivo no centro de São Paulo.

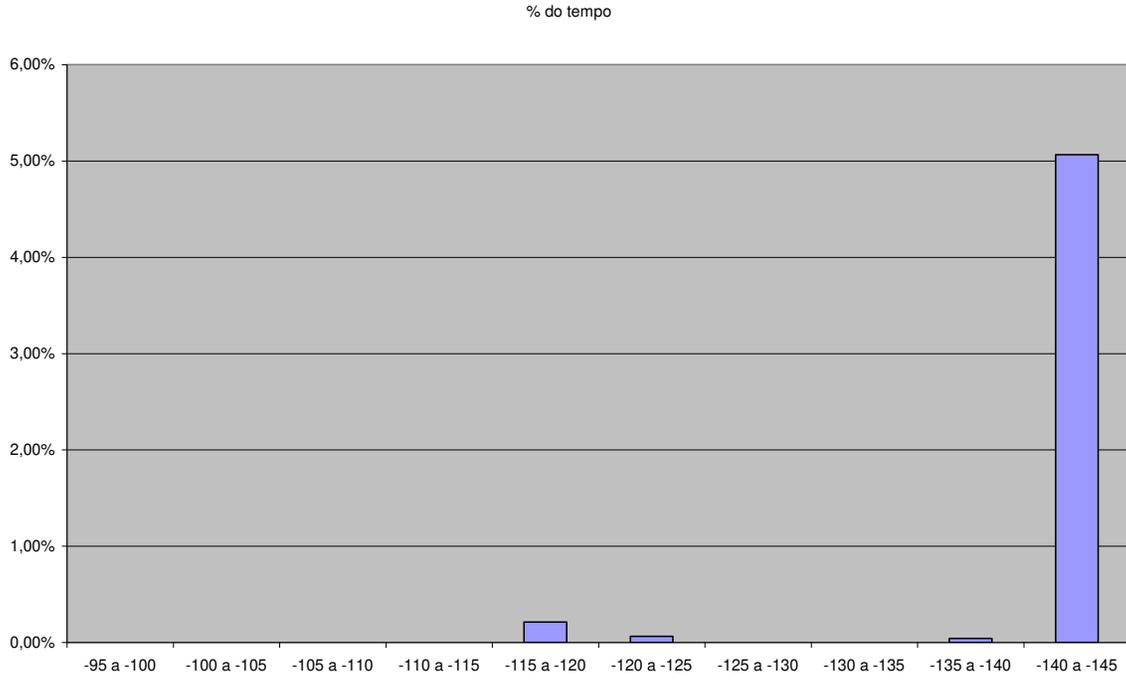


Figura 31 - Histograma da amplitude normalizada na Rod. Fernão Dias (dBm/Hz).

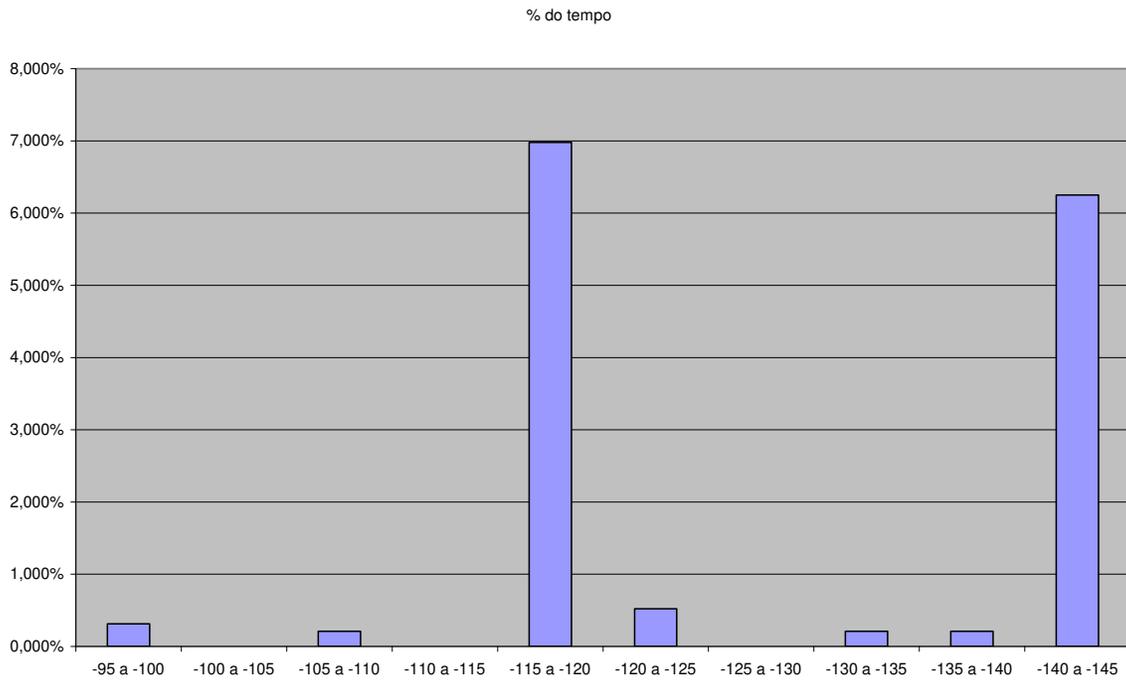


Figura 32 - Histograma da amplitude normalizada em Pirassununga (dBm/Hz).

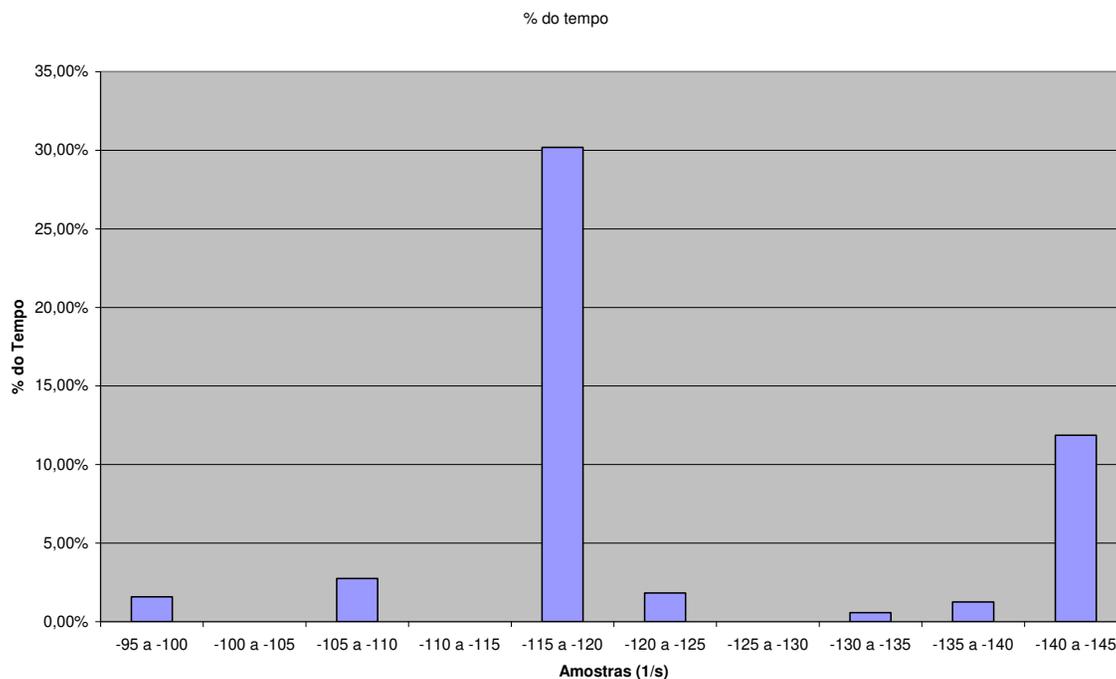


Figura 33 - Histograma da amplitude normalizada em São Paulo (dBm/Hz).

Algumas características sobre o comportamento do ruído impulsivo e seu impacto sobre o desempenho de um sistema de rádio acesso na faixa de UHF, podem ser aqui resumidos:

- A potência de pico do ruído impulsivo na área rural tende a ser 20 dB menor que em áreas urbanas.
- O patamar de ruído impulsivo, com amplitudes entre -140 e -145 dBm/Hz aparece nos três ambientes entre 5% e 12 % das amostras.
- Amplitudes de ruído impulsivo entre -115 e -120 dBm/Hz estão presentes nos três ambientes, em 0,2% das amostras na área rural, em 7% das amostras na área urbana e em 30% das amostras na área urbana densa.

3.4 - PERDA DE PERCURSO.

Os modelos de propagação utilizados para a estimativa de perda de percurso, ou de área de cobertura, na faixa de UHF, estão sedimentados em levantamentos exaustivos de medições em campo e modelagem analítica, inicialmente elaborados na década de 60, com reedições no início dos anos 2000. São modelos desenvolvidos para uma ampla gama de frequências, alturas de antenas, topografias e morfologias distintas. A acuidade desses modelos, quanto à predição, depende substancialmente da parametrização inicial, principalmente quanto às características do relevo e morfologia, variações do clima e variabilidade estatística de tempo, localização e situação.

As medições em campo de perda de percurso foram realizadas com o objetivo de correlacionar os valores medidos com as características do ambiente e com os valores de predição obtidos pelos modelos conhecidos. Esse procedimento visa permitir melhor entendimento e parametrização das ferramentas de predição para sua utilização no planejamento de cobertura de sistemas de rádio acesso na faixa de UHF, mais precisamente na faixa de 450 MHz.

A relação básica entre as potências de recepção e transmissão em um enlace rádio é dada pela equação de Friis, desenvolvida por Harald Trap Friis. Na sua forma mais simples, relaciona as potências de recepção e transmissão em um enlace em espaço livre, terminado por antenas isotrópicas ($Ganho = 1$, ou 0 dBi), como mostra a equação 3.1.

$$(Pr/Pt) = (\lambda/4\pi d)^2 \quad [3.1]$$

A perda de percurso PL (*Path Loss*) pode então ser expressa na forma logarítmica conforme expresso pela equação 3.2:

$$PL(dB) = 32,44 + 20 \log(f) + 20 \log(d), \text{ para } f \text{ em MHz e } d \text{ em km.} \quad [3.2]$$

Para a frequência central da faixa de interesse deste ensaio, de 460 MHz, a perda de percurso no espaço livre (LoS - *Line-Of-Sight*) pode ser expressa pela equação 3.3.

$$PL_{LOS}(dB) = 85,7 + 20\log(d), \text{ para } d \text{ em km.} \quad [3.3]$$

Para enlaces urbanos e suburbanos é usual aproximar-se os resultados de medições em campo por uma relação equivalente, com vistas a uma primeira aproximação de modelo de propagação, aqui referenciada como NLOS (*Non-Line-Of-Sight*) e expressa pela equação 3.4.

$$PL_{NLOS}(dB) = L_0 + \gamma \cdot 10\log(d) \quad [3.4]$$

Onde: L_0 é a perda inicial para $d=1$ km e γ define a taxa de variação da atenuação com a distância.

Quando essa relação é utilizada para modelar o comportamento da perda de percurso em ambientes urbanos e suburbanos, é esperado que γ assuma valores entre 2 e 5.

Os dados resultantes das medições em campo foram aqui pós-processados, inicialmente, por aproximações à equação genérica acima apresentada (3.4), com dois objetivos:

- Sistematizar, de uma forma prática, o resultado de cada radial avaliada, correlacionando esse resultado com algumas características da própria rota.
- Demonstrar que esse tipo de modelagem não é válido para regiões rurais, onde a topografia, a morfologia e as condições climáticas variam ao longo do enlace.

3.4.1 - Resultados do Ensaio Móvel

Rota 1 (R1)

A Figura 34 apresenta o percurso da Rota 1. Esse percurso teve seu início na cidade de Campinas (SP), seguindo a Noroeste até a região de Itirapina (SP) e Analândia (SP). Em Pirassununga foi realizada a medição de ruído impulsivo apresentado em 3.3. O percurso de retorno foi realizado pelas cidades de Mogi-Guaçu (SP) e Mogi-Mirim (SP). Nesta rota destacam-se as seguintes características quanto à coleta dos sinais:

- Potência no Ponto de Transmissão: +48 dBm (e.i.r.p.).
- Foi possível obter sinal útil até pouco depois da cidade de Limeira.

- No retorno, foi possível obter sinal útil a partir da região de Mogi-Mirim.
- Entre as cidades de Itirapina e Analândia, foi possível obter sinal útil a praticamente 100 km de distância, a 835 m de altitude em uma região de serra.



Figura 34 - Percurso da Rota 1.

Esse percurso gerou dados úteis que foram identificados pelas radiais R1N (Radial 1 Norte, entre Ptx e Mogi-Mirim) e R1NO (Radial 1 Noroeste, entre Ptx e Limeira).

Rota 1Norte (R1N)

A Figura 35 apresenta as características da radial R1N. Na Figura 36 é encontrada a representação gráfica dos valores de altitude e nível de sinal (RSSI) verificados em campo. A Figura 37 apresenta os valores de perda de percurso medidos ao longo da radial R1N e o ajuste desses pontos através da relação $PL_{NLOS}(dB) = L_0 + \gamma \cdot 10 \log(d)$.

Altitude Mínima	560,60	m
Altitude Máxima	717,50	m
Altitude Média	626,30	m
Desvio Padrão	37,25	m
Altitude Antena	692	m
Ha-nmt	65,70	m
Altitude HO	645	m
Distância HO	5500	m
Angulo HO	-0,49	Graus



Figura 35 - Características da radial R1N.

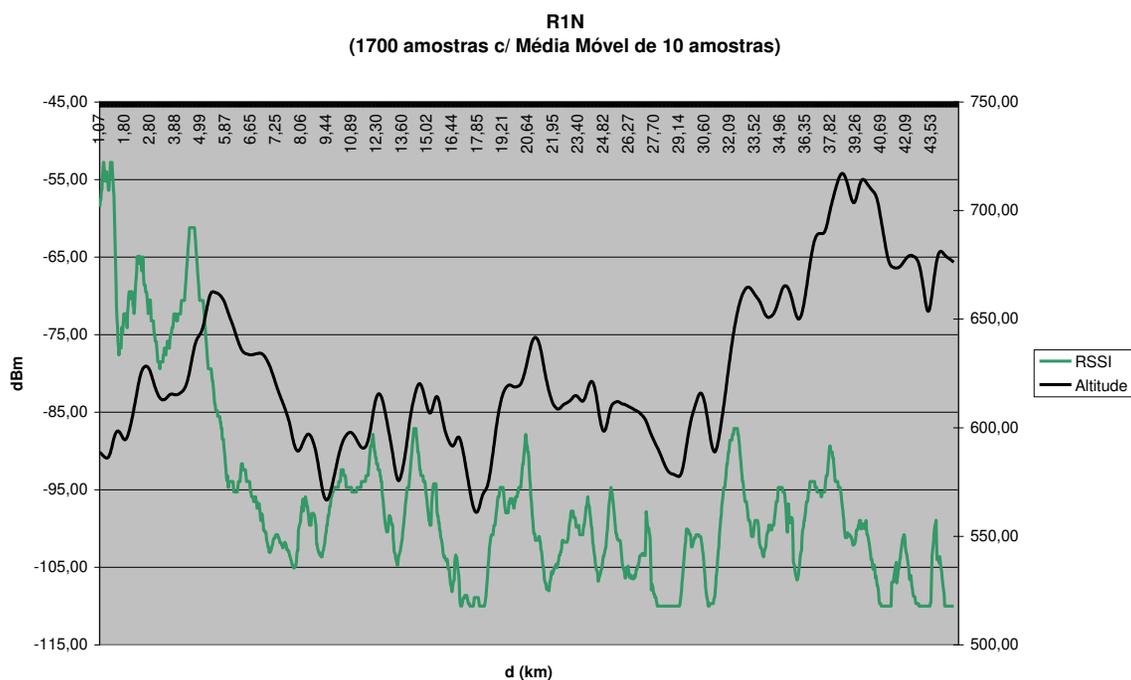


Figura 36 - Altitude e nível de sinal (RSSI) medidos na radial R1N.

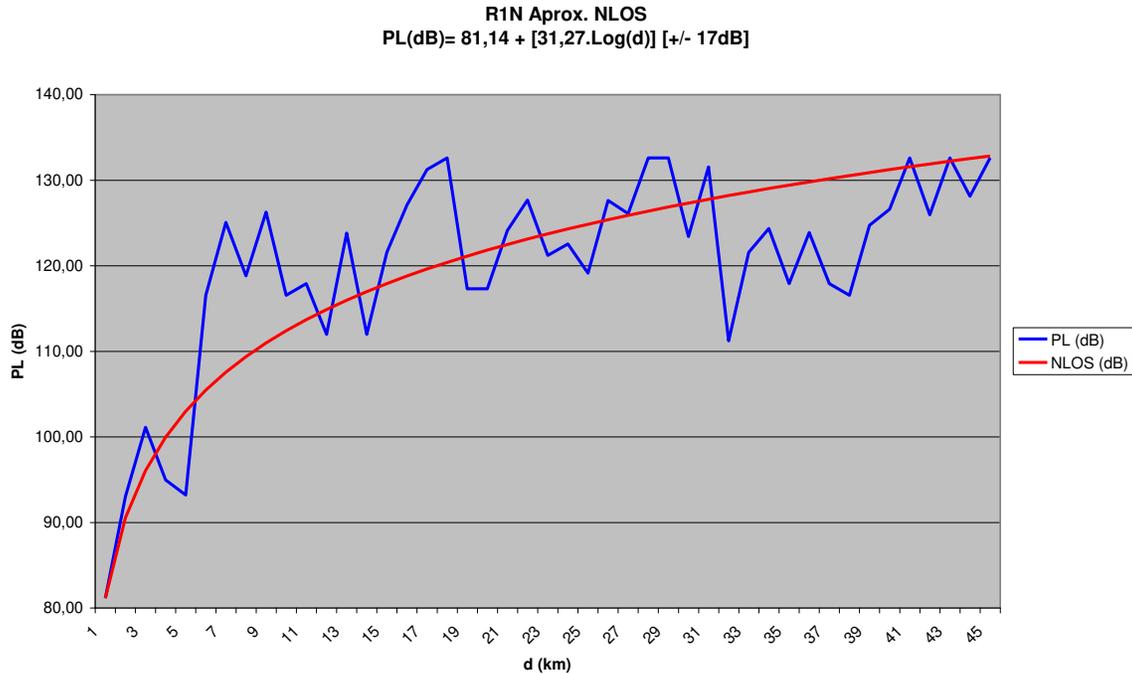


Figura 37 - Perda de percurso na radial R1N.

Destacam-se as seguintes características para a radial R1N:

- A antena de transmissão está acima do nível médio da rota (67,5 m).
- O Horizonte Ótico está localizado a 5,5 km do ponto de transmissão, abaixo da altura da antena, formando um ângulo de aproximadamente $-0,5^\circ$ com a visada da antena de transmissão.
- A rugosidade² da rota é de 25,1%.
- Para um limiar de -105 dBm, foi possível obter sinal útil, de forma contínua, até 15 km de distância. Com alguns pontos de interrupção, foi possível obter sinal útil até 45 km.
- Para essa radial é possível a utilização da equação simplificada de perda de percurso (NLOS) dada por $PL_{R1N}(\text{dB}) = 81 + 31,3 \cdot \text{Log}(d)$, com margem de erro da ordem de +/-17 dB.

² Para efeito desta avaliação, a rugosidade da rota foi definida como sendo:
 $Rg (\%) = [(Altitude \text{ Máxima} - Altitude \text{ Mínima}) / (Altitude \text{ média})] \times 100\%$.

Rota 1 Noroeste (R1NO)

A Figura 38 apresenta as características da radial R1NO. Na Figura 39 é encontrada a representação gráfica dos valores de altitude e nível de sinal (RSSI) verificados em campo. A Figura 40 apresenta os valores de perda de percurso medidos ao longo da radial R1NO e o ajuste desses pontos através da relação $PL_{NLOS}(dB) = L_o + \gamma \cdot 10 \log(d)$.

Altitude Mínima	512,80	m
Altitude Máxima	713,50	m
Altitude Média	610,43	m
Desvio Padrão	39,00	m
Altitude Antena	692	m
Ha-nmt	81,57	m
Altitude HO	713	m
Distância HO	49700	m
Angulo HO	0,024	Graus



Figura 38 - Características da radial R1NO.

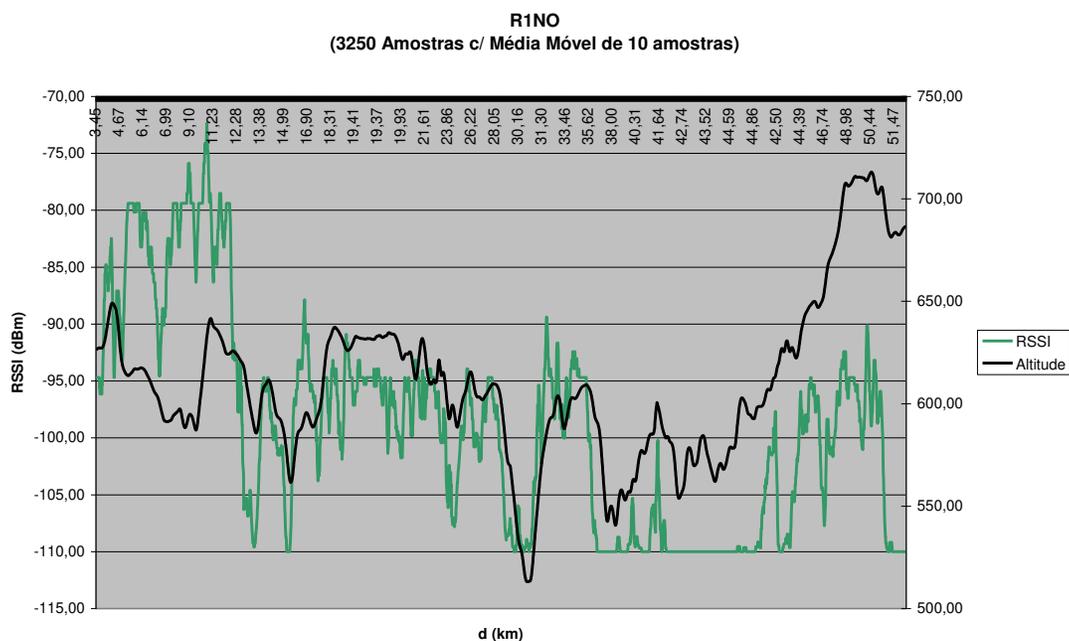


Figura 39 - Altitude e nível de sinal (RSSI) medidos na radial R1NO.

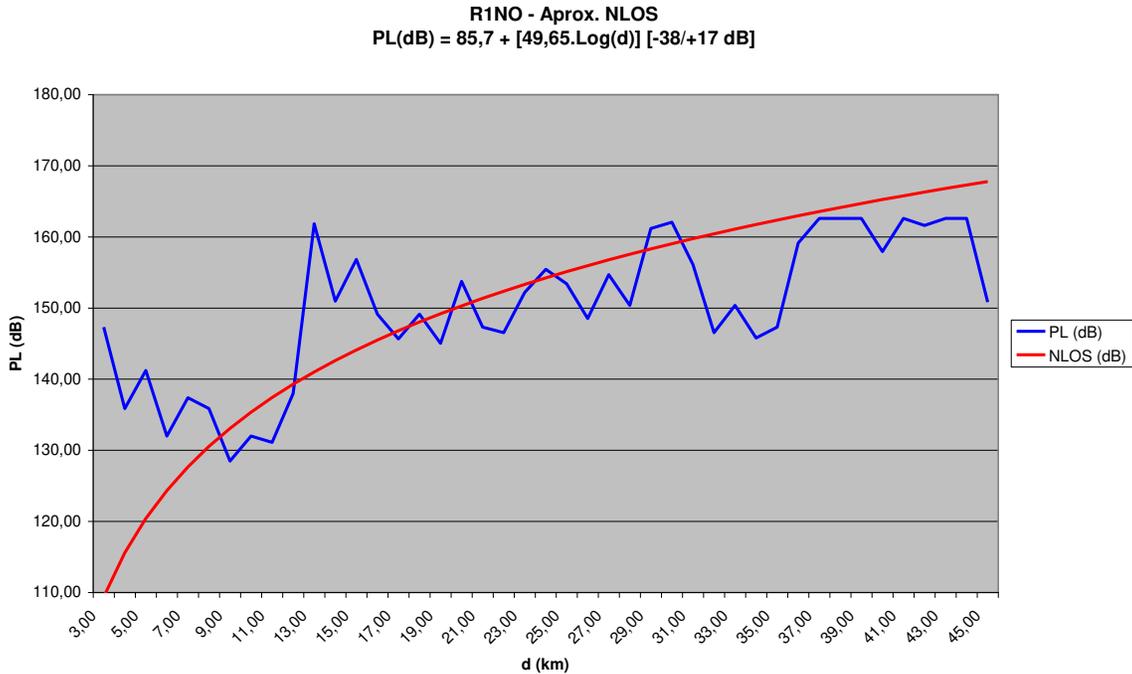


Figura 40 - Perda de percurso na radial R1NO.

Destacam-se as seguintes características para a radial R1NO:

- A antena de transmissão está acima do nível médio da rota (81,6 m).
- O Horizonte Ótico está localizado a 49,7 km do ponto de transmissão, acima da altura da antena, formando um ângulo de aproximadamente $0,02^\circ$ com a visada da antena de transmissão.
- A rugosidade da rota é de 32,9%.
- Para um limiar de -105 dBm, foi possível obter sinal útil, de forma contínua, até 12 km de distância. Com pontos de interrupção, foi possível obter sinal útil até 35 km.
- Para essa rota não é conveniente a utilização da equação simplificada de perda de percurso, pois a margem de erro é relativamente elevada, da ordem de -38 dB a +17 dB.
- Para esta radial é possível notar claramente as condições distintas de relevo ao longo do enlace, o que impede o modelamento por uma equação simples.

Rota 2 (R2)

A Figura 41 apresenta o percurso da Rota 2. Esse percurso teve seu início na cidade de Campinas (SP), seguindo a Sudoeste até a região de Sorocaba (SP) e Boituva (SP). O percurso de retorno foi realizado pelas cidades de Piracicaba e Americana. Nesta rota destacam-se as seguintes características quanto à coleta dos sinais:

- Ponto de Transmissão: +55 dBm (EIRP).
- A região urbana de Campinas obstruiu o sinal já na rota de saída.
- No retorno, foi possível obter sinal útil a partir da região de Americana.

Esse percurso gerou dados úteis que foram identificados pelas radiais R2O (Radial 2 Oeste, entre Ptx e Piracicaba) e R2SO (Radial 1 Sudoeste, entre Ptx e Sorocaba).



Figura 41 - Percurso da Rota 2.

Rota 2 Oeste (R2O)

A Figura 42 apresenta as características da radial R2O. Na Figura 43 é encontrada a representação gráfica dos valores de altitude e nível de sinal (RSSI) verificados em campo. A Figura 44 apresenta os valores de perda de percurso medidos ao longo da radial R2O e o ajuste desses pontos através da relação $PL_{NLOS}(dB) = L_o + \gamma \cdot 10\log(d)$.

Altitude Mínima	503,70	m
Altitude Máxima	697,30	m
Altitude Média	595,69	m
Desvio Padrão	37,83	m
Altitude Antena	692	m
Ha-nmt	96,31	m
Altitude HO	652	m
Distância HO	16400	m
Ângulo HO	-0,14	Graus



Figura 42 - Características da radial R20.

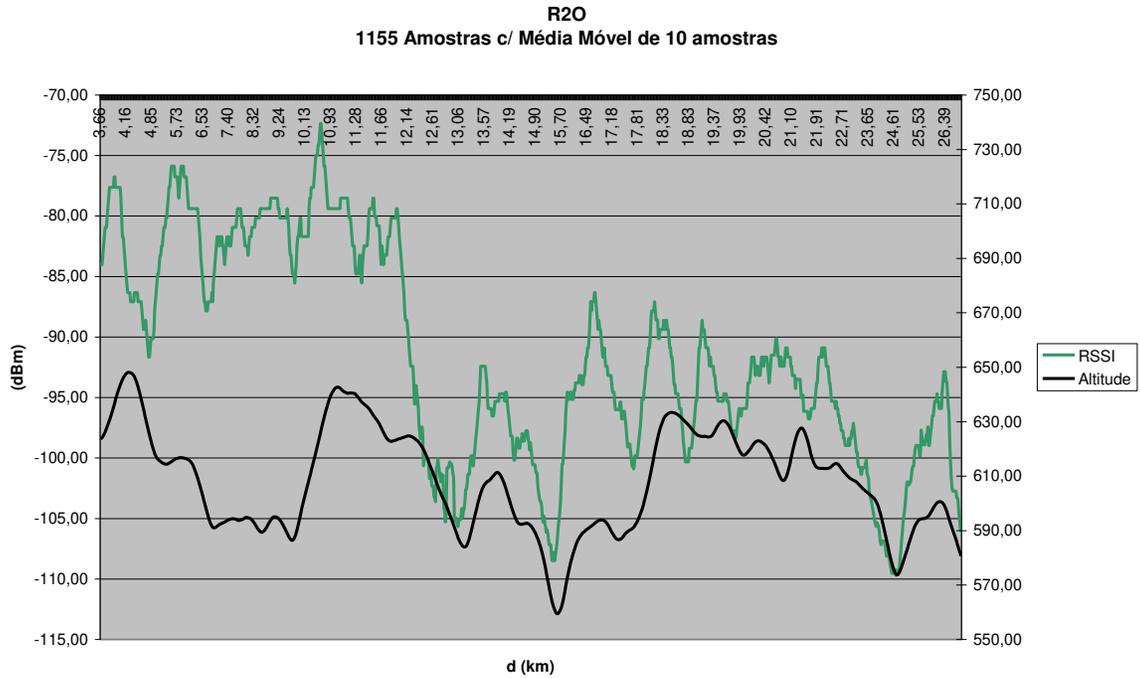


Figura 43 - Altitude e nível de sinal (RSSI) medidos na radial R20.

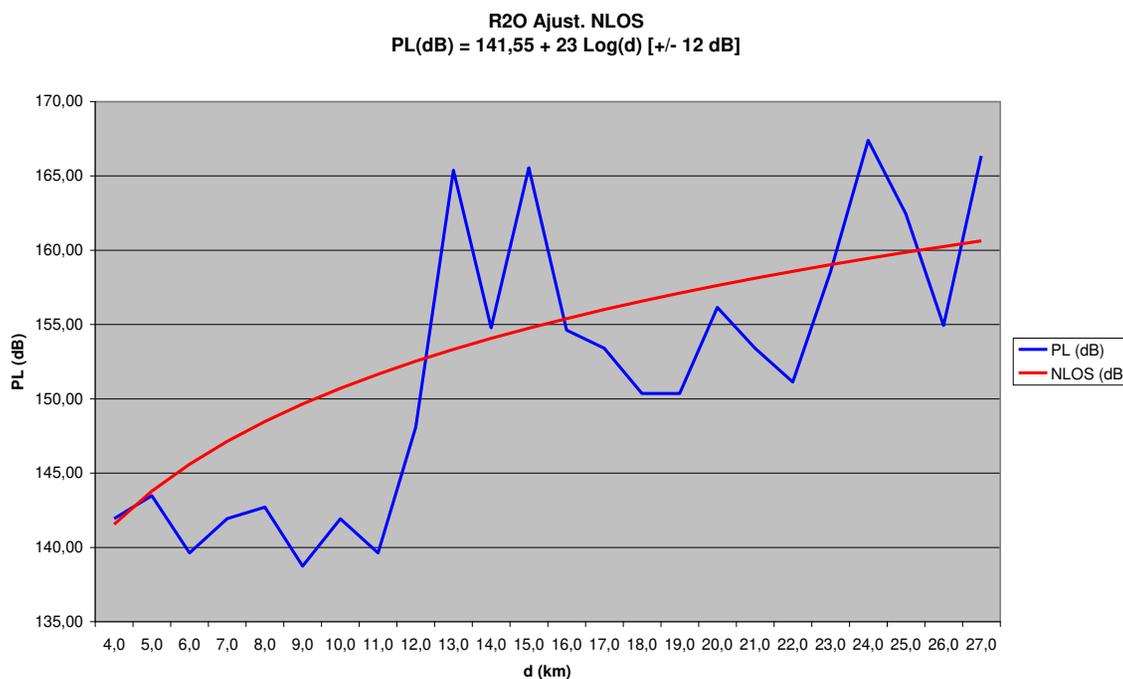


Figura 44 - Perda de percurso na radial R20.

Destacam-se as seguintes características para a radial R20:

- A antena de transmissão está acima do nível médio da rota (96,3 m).
- O Horizonte Ótico está localizado a 16,4 km do ponto de transmissão, abaixo da altura da antena, formando um ângulo de aproximadamente $-0,14^\circ$ com a visada da antena de transmissão.
- A rugosidade da rota é de 32,5%.
- Para um limiar de -105 dBm, foi possível obter sinal útil, de forma contínua, até 15 km de distância. Com alguns pontos de interrupção, foi possível obter sinal útil até 27 km.
- Para essa radial é possível a utilização da equação simplificada de perda de percurso, dada por $PL_{R20}(dB) = 144,5 + 23 \cdot \text{Log}(d)$, pois a margem de erro é da ordem de ± 12 dB.

Rota 2 Sudoeste (R2SO)

A Figura 45 apresenta as características da radial R1SO. Na Figura 46 é encontrada a representação gráfica dos valores de altitude e nível de sinal (RSSI) verificados em campo. A Figura 47 apresenta os valores de perda de percurso medidos ao longo da radial R2SO e o ajuste desses pontos através da relação $PL_{NLOS}(dB) = Lo + \gamma \cdot 10 \log(d)$.

Altitude Mínima	515,10	m
Altitude Máxima	698,40	m
Altitude Média	600,91	m
Desvio Padrão	37,85	m
Altitude Antena	692	m
Ha-nmt	91,09	m
Altitude HO	674	m
Distância HO	573	m
Ângulo HO	-1,80	Graus



Figura 45 - Características da radial R2SO.

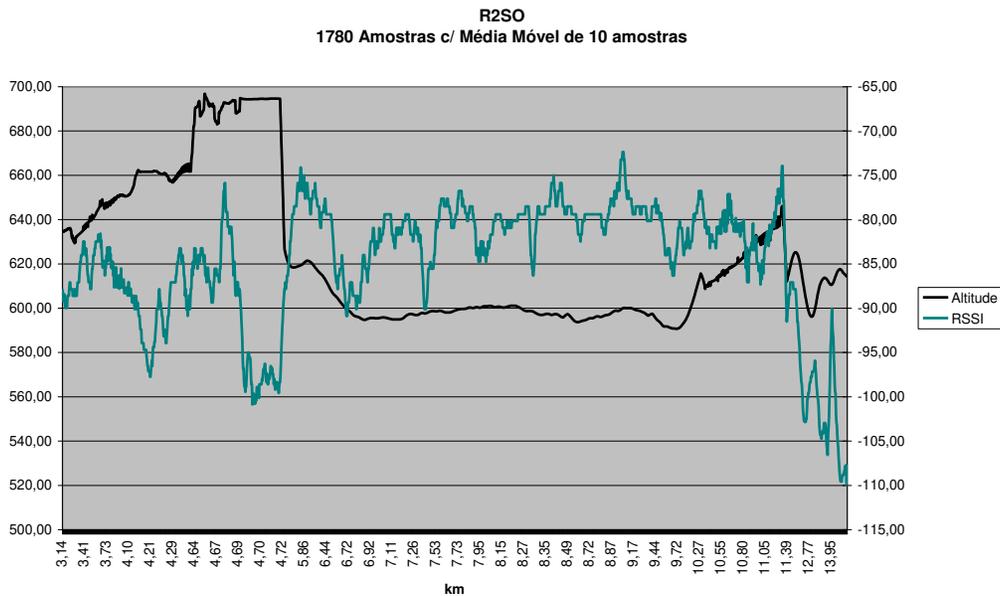


Figura 46 - Altitude e nível de sinal (RSSI) medidos na radial R2SO.

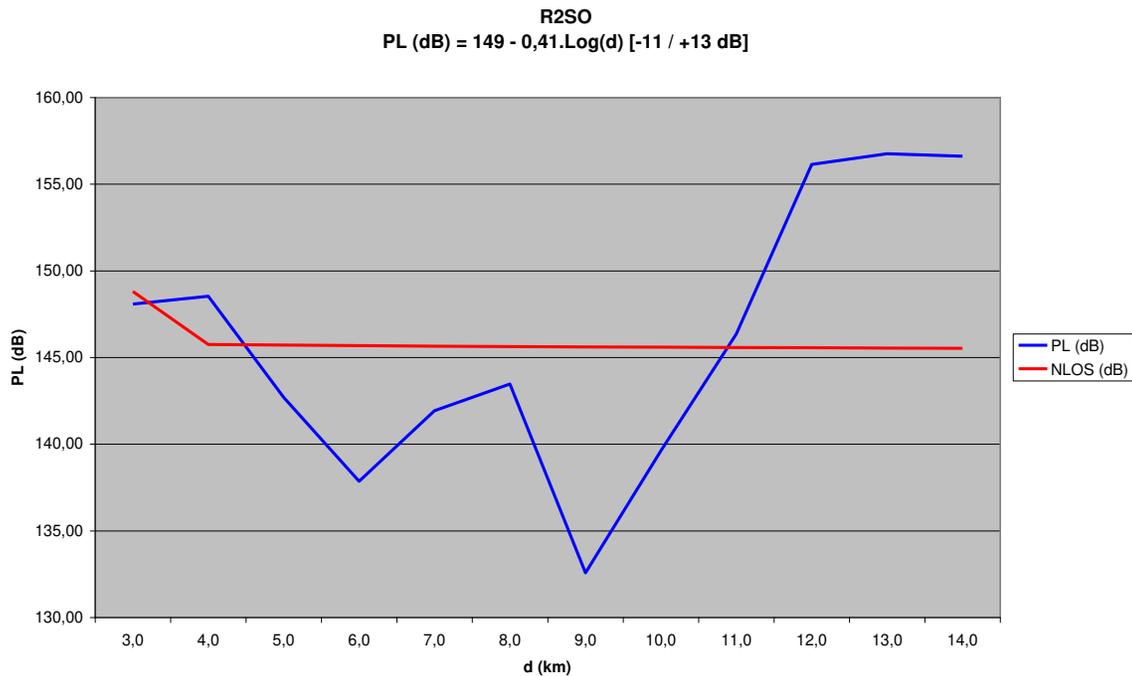


Figura 47 - Perda de percurso na radial R2SO.

Destacam-se as seguintes características para a radial R2SO:

- A antena de transmissão está acima do nível médio da rota (91 m).
- O Horizonte Ótico está localizado a 573 m do ponto de transmissão, abaixo da altura da antena, formando um ângulo de aproximadamente $-1,8^\circ$ com a visada da antena de transmissão.
- A rugosidade da rota é de 30,5%.
- Para um limiar de -105 dBm , foi possível obter sinal útil, de forma contínua, até 12 km de distância.
- Para essa radial $\gamma=0,041$ e, portanto, não é possível a utilização da equação simplificada de perda de percurso, uma vez que o menor valor de γ é 2,0, quando a propagação se dá em espaço livre (LoS).

Rota 3 (R3)

A Figura 48 apresenta o percurso da Rota 3. Esse percurso teve seu início na cidade de Campinas (SP), seguindo a Nordeste até a região de Águas de Lindóia (SP). No perímetro externo da cidade de Bragança Paulista (SP) foi realizada a medição de ruído impulsivo apresentado em 3.3. O percurso de retorno foi realizado pelas cidades de Socorro e Bragança Paulista. Nesta rota destacam-se as seguintes características quanto à coleta dos sinais:

- Potência no Ponto de Transmissão: +55 dBm (EIRP).
- Foi possível obter sinal útil até pouco depois da cidade de Jaguariúna.
- No retorno, foi possível obter sinal útil a partir da região de Itatiba.
- Nos pontos altos das cidades de Lindóia e Águas de Lindóia, foi possível obter sinal útil a praticamente 60 km de distância, a 1000 m de altitude em uma região de serra.



Figura 48 - Percurso da Rota 3.

Esse percurso gerou dados úteis que foram identificados pelas radiais R3E (Radial 3 Este, entre Ptx e Bragança Paulista) e R3NE (Radial 3 Nordeste, entre Ptx e Jaguariúna).

Rota 3 Este (R3E)

A Figura 49 apresenta as características da radial R3E. Na Figura 50 é encontrada a representação gráfica dos valores de altitude e nível de sinal (RSSI) verificados em campo. A Figura 51 apresenta os valores de perda de percurso medidos ao longo da radial R3E e o ajuste desses pontos através da relação $PL_{NLOS}(dB) = Lo + \gamma \cdot 10\log(d)$.

Altitude Mínima	619,90	m
Altitude Máxima	878,40	m
Altitude Média	752,94	m
Desvio Padrão	65,43	m
Altitude Antena	692	m
Ha-nmt	-60,94	m
Altitude HO	911	m
Distância HO	17000	m
Ângulo HO	0,74	Graus



Figura 49 - Características da radial R3E.

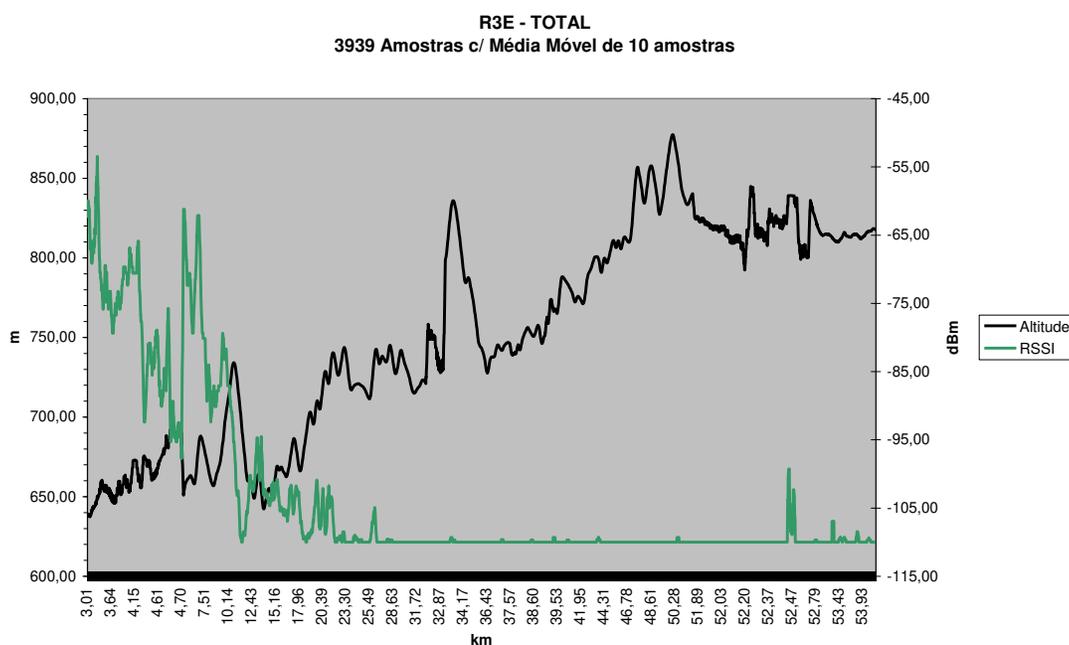


Figura 50 - Altitude e nível de sinal (RSSI) medidos na radial R3E.

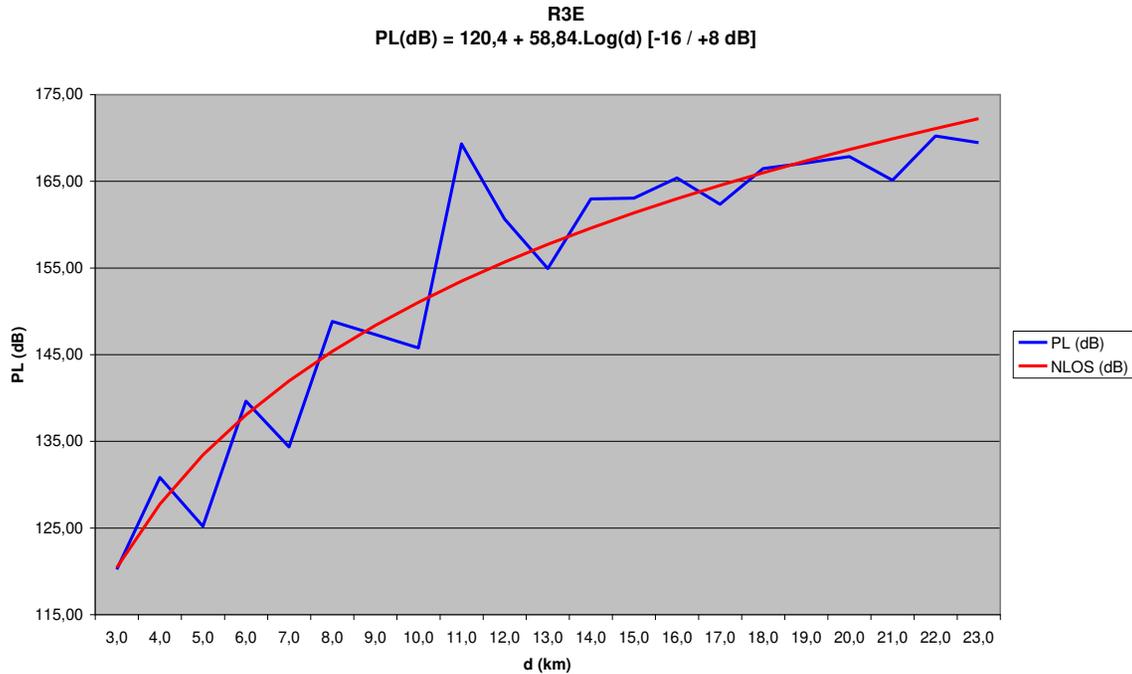


Figura 51 - Perda de percurso na radial R3E.

Destacam-se as seguintes características para a radial R3E:

- A antena de transmissão está abaixo do nível médio da rota (-61 m).
- O Horizonte Ótico está localizado a 17 km do ponto de transmissão, acima da altura da antena, formando um ângulo de aproximadamente $0,74^\circ$ com a visada da antena de transmissão.
- A rugosidade da rota é de 34,3%.
- Para um limiar de -105 dBm, foi possível obter sinal útil, de forma contínua, até 20 km de distância.
- Para essa rota é possível a utilização da equação simplificada de perda de percurso $PL_{R3E} (dB) = 120 + 59 \cdot \text{Log}(d)$, com margem de erro de -16 dB a +8dB.

Rota 3 Nordeste (R3NE)

A Figura 52 apresenta as características da radial R3NE. Na Figura 53 é encontrada a representação gráfica dos valores de altitude e nível de sinal (RSSI) verificados em campo. A Figura 54 apresenta os valores de perda de percurso medidos ao longo da radial R3NE e o ajuste desses pontos através da relação $PL_{NLOS}(dB) = L_o + \gamma \cdot 10 \log(d)$.

Altitude Mínima	568,30	m
Altitude Máxima	693,30	m
Altitude Média	620,25	m
Desvio Padrão	42,62	m
Altitude Antena	692	m
Ha-nmt	71,75	m
Altitude HO	796	m
Distância HO	13600	m
Ângulo HO	0,44	Graus



Figura 52 - Características da radial R3NE.

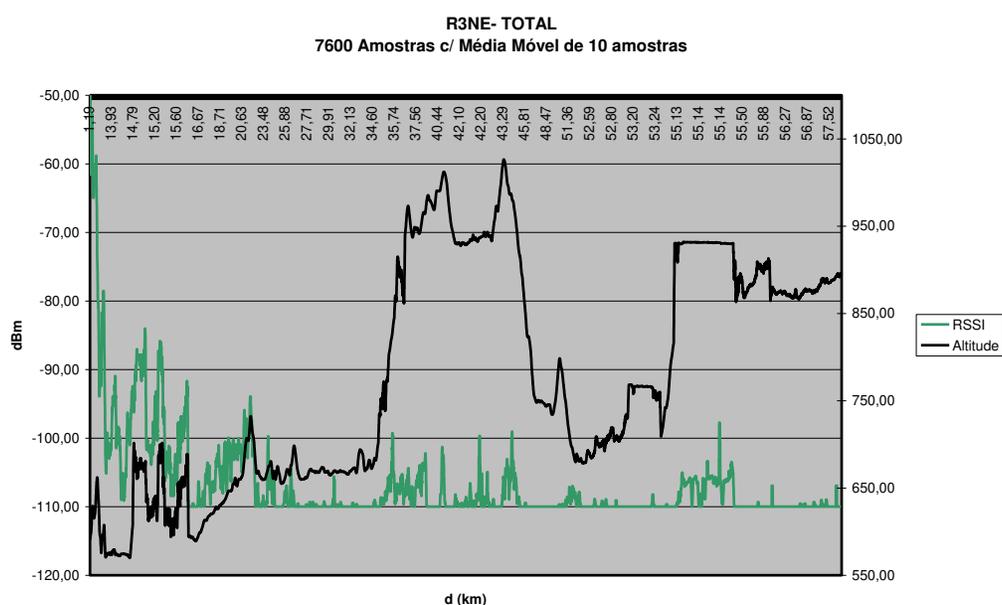


Figura 53 - Altitude e nível de sinal (RSSI) medidos na radial R3NE.

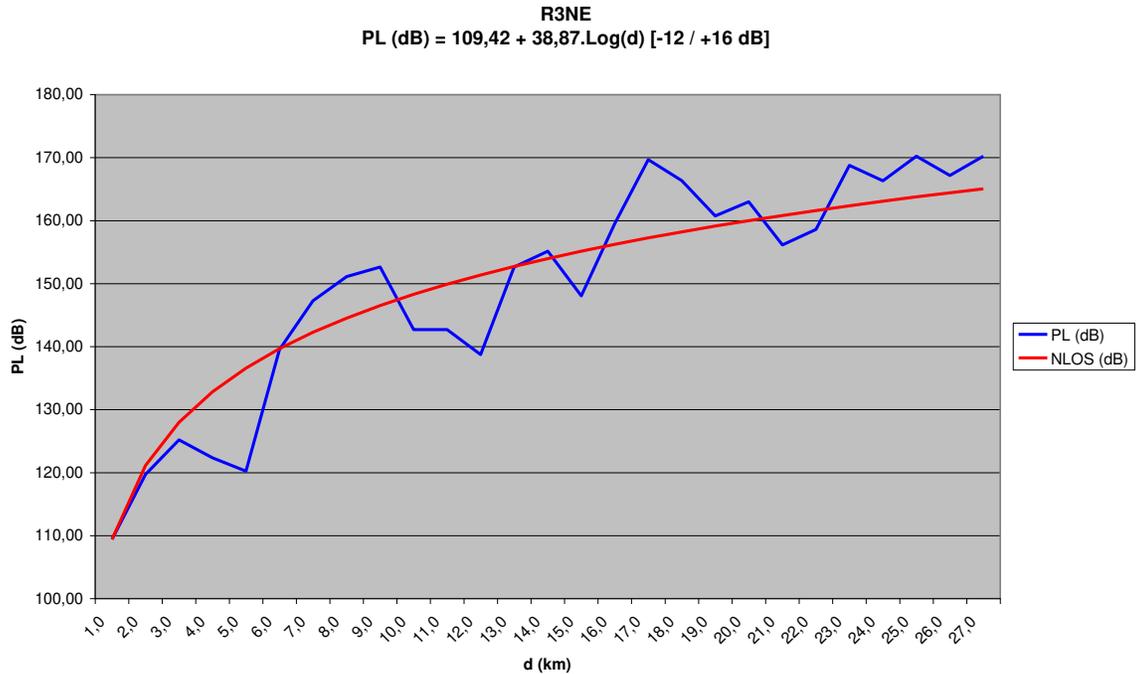


Figura 54 - Perda de percurso na radial R3NE.

Destacam-se as seguintes características para a radial R3NE:

- A antena de transmissão está acima do nível médio da rota (72 m).
- O Horizonte Ótico está localizado a 13,6 km do ponto de transmissão, acima da altura da antena, formando um ângulo de aproximadamente $0,44^\circ$ com a visada da antena de transmissão.
- A rugosidade da rota é de 20,2%.
- Para um limiar de -105 dBm, foi possível obter sinal útil, de forma contínua, até 16 km de distância.
- Para essa radial é possível a utilização da equação simplificada de perda de percurso $PL_{R3NE} (dB) = 109,4 + 39 \cdot \text{Log}(d)$, com margem de erro de -12 dB a +16dB.

Rota 4 (R4)

A Figura 55 apresenta o percurso da Rota 4. Esse percurso teve seu início na cidade de Campinas (SP), seguindo a Sudeste até a região de Atibaia (SP). Em São Paulo foi realizada a medição de ruído impulsivo, apresentada em 3.3. O percurso de retorno foi realizado pelas cidades de São Paulo (SP) e Jundiaí (SP). Nesta rota destacam-se as seguintes características quanto à coleta dos sinais:

- Potência no Ponto de Transmissão: +55 dBm.
- Foi possível obter sinal útil até pouco antes de Itatiba.
- No retorno, só foi possível obter sinal útil dentro da região urbana de Campinas.
- Mesmo no alto do Pico do Jaraguá, a 1080m de altitude, não foi possível obter sinal mensurável, talvez pela interferência e bloqueio causados pelas emissoras de rádio e TV presentes naquela localidade.



Figura 55 - Percurso da Rota 4

Esse percurso gerou dados úteis que foram identificados pelas radiais R4S (Radial 4 Sul, entre Ptx e Jundiaí) e R4SE (Radial 4 Sudeste, entre Ptx e Atibaia).

Rota 4 Sul (R4S)

A figura 56 apresenta as características da radial R4S. Na figura 57 é encontrada a representação gráfica dos valores de altitude e nível de sinal (RSSI) verificados em campo. A figura 58 apresenta os valores de perda de percurso medidos ao longo da radial R4S e o ajuste desses pontos através da relação $PL_{NLOS}(dB) = L_0 + \gamma \cdot 10 \log(d)$.

Altitude Mínima	643,50	m
Altitude Máxima	753,60	m
Altitude Média	689,52	m
Desvio Padrão	28,77	m
Altitude Antena	692	m
Ha-nmt	2,48	m
Altitude HO	698	m
Distância HO	1500	m
Ângulo HO	0,23	Graus



Figura 56 - Características da radial R4S.

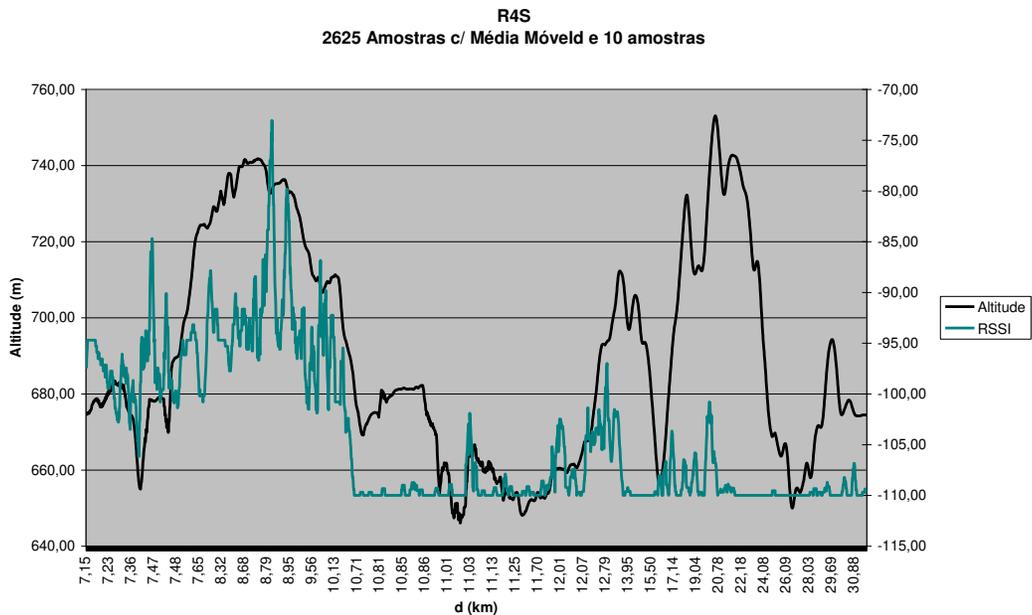


Figura 57 - Altitude e nível de sinal (RSSI) medidos na radial R4S.

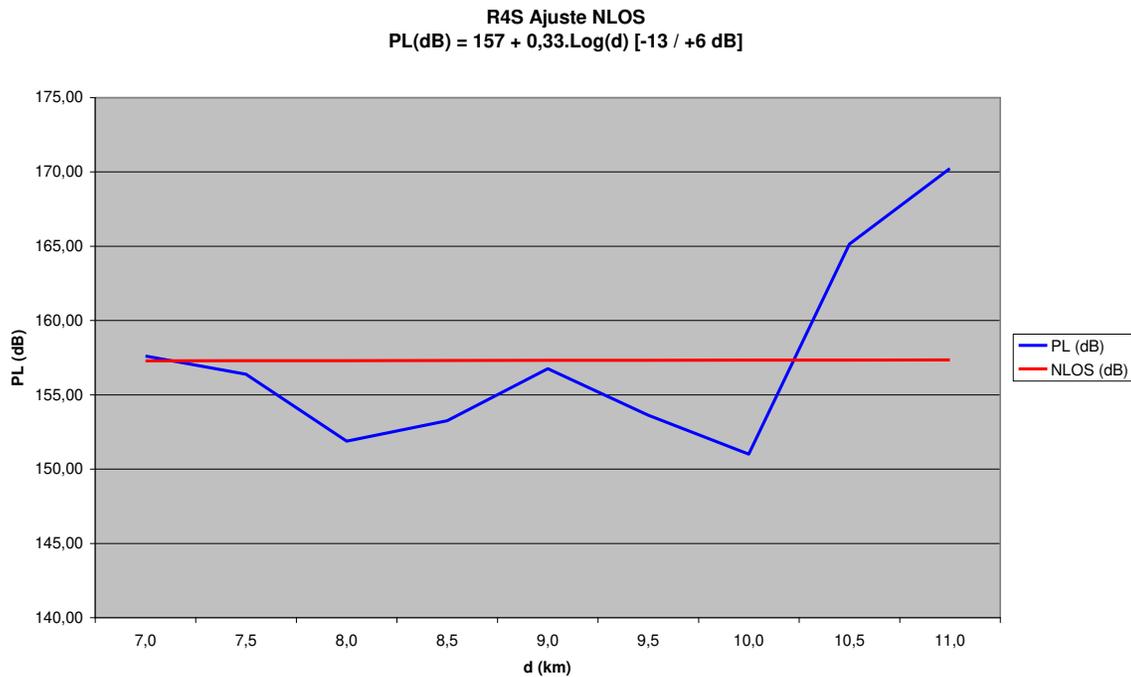


Figura 58 - Perda de percurso na radial R4S.

Destacam-se as seguintes características para a radial R4S:

- A antena de transmissão está pouco acima do nível médio da rota (2,5 m).
- O Horizonte Ótico está localizado a 1,5 km do ponto de transmissão, pouco acima da altura da antena, formando um ângulo de aproximadamente $0,23^\circ$ com a visada da antena de transmissão.
- A rugosidade da rota é de 16,0%.
- Para um limiar de -105 dBm, foi possível obter sinal útil, de forma contínua, até 10 km de distância.
- Para essa radial $\gamma=0,033$ e, portanto, não é possível a utilização da equação simplificada de perda de percurso, uma vez que o menor valor de γ é 2,0, quando a propagação se dá em espaço livre (LoS).

Rota 4 Sudeste (R4SE)

A Figura 59 apresenta as características da radial R4SE. Na Figura 60 é encontrada a representação gráfica dos valores de altitude e nível de sinal (RSSI) verificados em campo. A Figura 61 apresenta os valores de perda de percurso medidos ao longo da radial R4SE e o ajuste desses pontos através da relação $PL_{NLOS}(dB) = L_o + \gamma \cdot 10\log(d)$.

Altitude Mínima	622,90	m
Altitude Máxima	814,60	m
Altitude Média	723,98	m
Desvio Padrão	45,85	m
Altitude Antena	692	m
Ha-nmt	-31,98	m
Altitude HO	738	m
Distância HO	6450	m
Ângulo HO	0,41	Graus



Figura 59 - Características da radial R4SE.

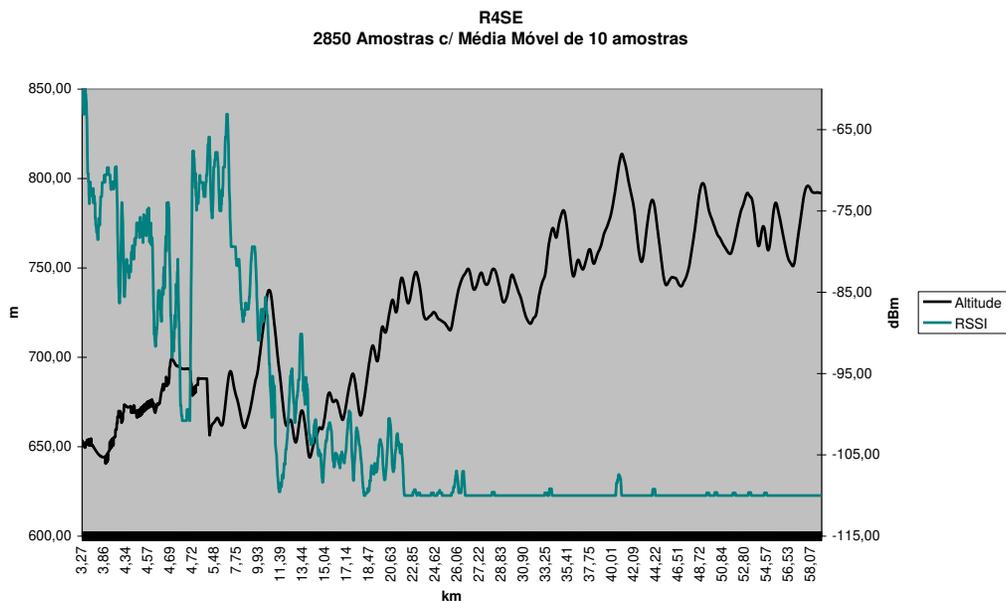


Figura 60 - Altitude e nível de sinal (RSSI) medidos na radial R4SE.

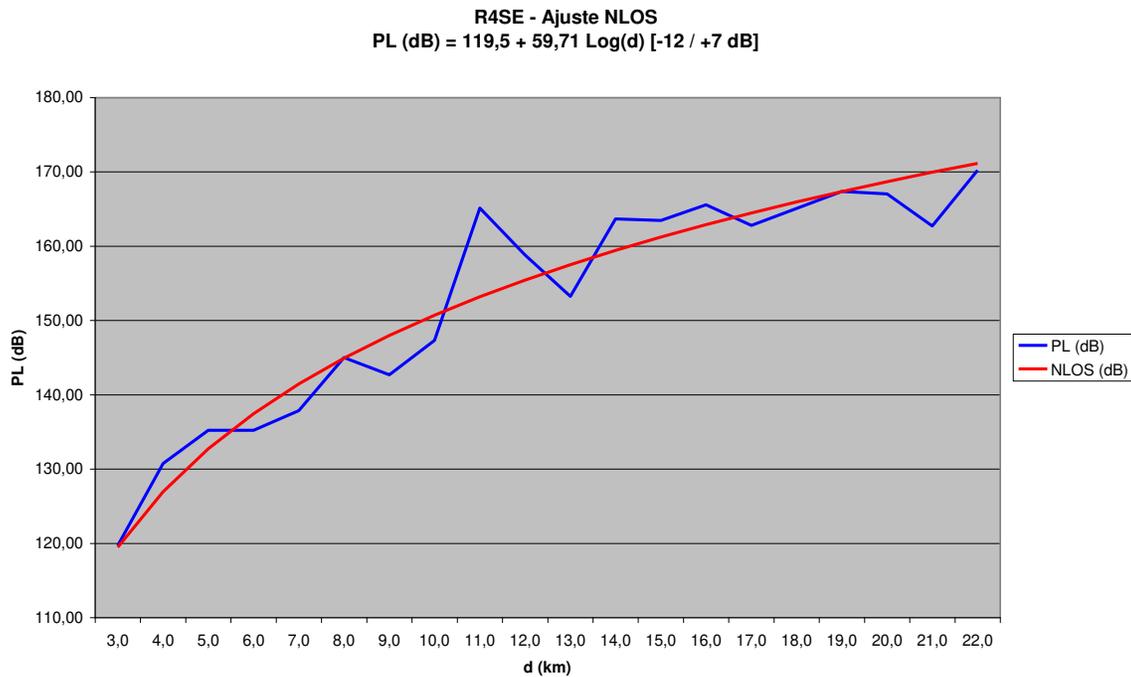


Figura 61 - Perda de percurso na radial R4SE.

Destacam-se as seguintes características para a radial R4SE:

- A antena de transmissão está abaixo do nível médio da rota (32 m).
- O Horizonte Ótico está localizado a 6,5 km do ponto de transmissão, pouco acima da altura da antena, formando um ângulo de aproximadamente $0,41^\circ$ com a visada da antena de transmissão.
- A rugosidade da rota é de 26,5%.
- Para um limiar de -105 dBm, foi possível obter sinal útil, de forma contínua, até 18 km de distância.
- Para essa rota é possível a utilização da equação simplificada de perda de percurso $PL_{R4SE} \text{ (dB)} = 119,5 + 59,7 \cdot \text{Log}(d)$, com margem de erro de -12 dB a +7dB.

3.4.2 - Resumo dos resultados obtidos no Ensaio Móvel

A Tabela 6 apresenta o resumo dos resultados obtidos nas oito radiais avaliadas e suas principais características topográficas.

Tabela 6 - Resumo dos resultados do Ensaio Móvel.

ROTA	RADIAL	RUG	DESVPAD (m)	HNMT (m)	ANG.HO (Graus)	DIST.HO (m)	D.UTIL (km)	NLOS	GAMA	Lo (dB)	Err(-) (dB)	Err(+) (dB)
2	O	32,5%	37,83	96,31	-0,14	16400	12	sim	2,30	141,6	-12	12
1	N	25,1%	37,25	65,70	-0,490	5500	15	sim	3,13	81,1	-17	17
3	NE	20,2%	42,62	71,75	0,44	13600	16	sim	3,89	109,4	-12	16
1	NO	32,9%	39,00	81,57	0,024	49700	12	sim	4,97	85,7	-38	17
3	E	34,3%	65,43	-60,94	0,74	17000	20	sim	5,88	120,4	-16	8
4	SE	26,5%	45,85	-31,98	0,41	6450	18	sim	5,97	119,5	-12	7
4	S	16,0%	28,77	2,48	0,23	1500	10	não	na	na	na	na
2	SO	30,5%	37,85	91,09	-1,800	573	15	não	na	na	na	na

A partir desses dados pode-se observar que:

- Para o relevo das oito radiais avaliadas, em torno do Ponto de Transmissão, raios de cobertura contínua entre 12km e 20km podem ser esperados.
- Foi constatada uma grande variabilidade na altura da antena do Ponto de Transmissão em relação à altitude média do terreno. O valor de H_a-nmt^3 variou entre -61m e +96m.
- Das oito radiais avaliadas, a perda de percurso de seis radiais pode ser representada pelo modelo NLOS proposto. Para essas seis radiais o valor de γ variou entre 2,6 e 6,0. O valor da perda de percurso, para a distância de 1km, variou entre 81,1dB e 141,6 dB.
- As duas radiais, para as quais não foi possível aplicar o modelo NLOS, apresentam as seguintes características:
 - R4S - O valor de H_a-nmt está próximo de zero e o horizonte ótico está próximo (1500m). Nesse caso o modelo de propagação por difração é preponderante em relação aos modelos de perda no espaço livre ou de dois raios.

³ H_a-nmt – Altura da antena em relação ao nível médio do terreno.

- R2SO - Apesar de o valor da H_a -nmt ser elevado (91m), o horizonte ótico está extremamente próximo (573m), seguido de um relevo baixo e plano. Da mesma forma, o modelo de propagação por difração é preponderante em relação aos modelos de perda no espaço livre ou de dois raios.
- O valor de Gama, para o modelo aproximado NLOS, manteve-se dentro dos valores esperados para a propagação em ambiente rural ($2,0 < \gamma < 4$), para as radiais com valor de H_a -nmt elevado e horizonte ótico distante. A radial R1NO não atendeu a essa tendência.
- A análise da radial R1NO apresenta os seguintes detalhes:
 - A Figura 38 apresenta um relevo extremamente favorável, sem obstruções próximas.
 - Já as Figuras 39 e 40 mostram claramente a existência de dois ambientes de propagação distintos, um até 12km e outro a partir de 12km, até 45km.
 - Este é um exemplo concreto de propagação através de ambientes distintos, que impossibilita a modelagem através de uma única aproximação.
- Para duas rotas analisadas (R3E e R3SE) o valor de Gama na aproximação NLOS situou-se próximo ao valor máximo (6,0). Essa característica pode ser associada ao fato de a antena de transmissão estar bem abaixo do nível médio da radial (-32m e -61m).
- Para cinco das oito radiais analisadas, a aproximação pelo modelo NLOS pode ser realizada com erro de predição menor que +/-17dB. Para as demais radiais a aproximação por um único modelo ao longo do enlace não é aplicável. Nesses casos, o enlace total deverá ser subdividido em trechos e modelado por partes, ou uma modelagem analítica deverá ser aplicada.

3.4.3 - Resultados do Ensaio Fixo

O Ensaio Fixo foi composto por cinco enlaces ponto-a-ponto estabelecidos entre o ponto de transmissão e cinco localidades escolhidas por apresentarem condições topográficas e de logísticas adequadas à instalação da estação terminal de medição. Esse ensaio teve por objetivo responder às seguintes questões:

- Variação da perda de percurso em função da altura da antena do terminal.
- Variação da perda de percurso em função da polarização das antenas.
- Avaliação da perda de percurso ponto-a-ponto.
- Discriminação de polarização no ponto de recepção (terminal).

Os cinco pontos de medição e sua distância em relação ao Ponto de Transmissão estão identificados na Tabela 7.

Tabela 7 - Pontos de recepção e sua distância ao ponto de transmissão.

Prx	FA	HO	SE	RE	VA
d (km)	11,3	19,0	20,7	32,8	38,0

A Tabela 8 apresenta os valores de sinal recebido (RSSI) e a respectiva perda de percurso (PL), obtidos durante o ensaio fixo.

Tabela 8 - Sinal recebido (RSSI) e perda de percurso (PL)

	FA		SE		VA		RE		HO		Unidade
	V	H	V	H	V	H	V	H	V	H	
RSSI											
2m	-64,0	-68,4	-73,9	-80,0	-83,4	-86,7	-73,7	-75,4	-54,8	-57	dBm
4m	-59,3	-60,4	-71,0	-73,3	-79,7	-83,8	-69,8	-74,8	-54,4	-54,9	dBm
6m	-57,4	-60,7	-65,8	-71,3	-81,3	-78,7	-64,8	-69,5	-52,4	-55,1	dBm
8m	-58,8	-60,5	-63,4	-65,4	-72,3	-73,1	-60,2	-64,0	-53,2	-57,7	dBm
10m	-58,2	-60,8	-61,3	-62,3	-70,5	-72,2	-57,7	-62,2	-50,1	-53,8	dBm
PL(dB)											
2m	129,4	133,8	139,3	145,4	148,8	152,1	139,1	140,8	120,2	122,4	dB
4m	124,7	125,8	136,4	138,7	145,1	149,2	135,2	140,2	119,8	120,3	dB
6m	122,8	126,1	131,2	136,7	146,7	144,1	130,2	134,9	117,8	120,5	dB
8m	124,2	125,9	128,8	130,8	137,7	138,5	125,6	129,4	118,6	123,1	dB
10m	123,6	126,2	126,7	127,7	135,9	137,6	123,1	127,6	115,5	119,2	dB

Varição da Perda de Percurso em Função da Altura da Antena do Terminal.

A Tabela 9 apresenta os resultados do "ganho de altura", ou seja, a variação da perda de percurso em função da altura da antena do terminal.

Tabela 9 - Perda de percurso X Altura da antena do Terminal

GalturaV	2m	4m	6m	8m	10m	GalturaH	2m	4m	6m	8m	10m
FA	0,0	4,7	1,9	-1,4	0,6	FA	0,0	8,0	-0,3	0,2	-0,3
SE	0,0	2,9	5,2	2,4	2,1	SE	0,0	6,7	2,0	5,9	3,1
VA	0,0	3,7	-1,6	9,0	1,8	VA	0,0	2,9	5,1	5,6	0,9
RE	0,0	3,9	5,0	4,6	2,5	RE	0,0	0,6	5,3	5,5	1,8
HO	0,0	0,4	2,0	-0,8	3,1	HO	0,0	2,1	-0,2	-2,6	3,9
Média	0,0	3,1	2,5	2,8	2,0	Média	0,0	4,1	2,4	2,9	1,9

Algumas observações podem ser feitas a respeito desse resultado:

- A variação da perda de percurso para antenas na polarização horizontal é maior que para antenas na polarização vertical. Pode-se especular que o campo elétrico horizontal é mais suscetível à proximidade com o solo que o campo elétrico vertical, ortogonal ao solo.
- A variação da perda de percurso é maior para alturas de antena de terminal entre 2 e 4 metros, possivelmente devido à sua interação com a morfologia próxima, como vegetação, edificações e o próprio solo.
- Variações entre 1,0 dB/m e 1,5 dB/m (2 a 3 dB @ 2m) foram verificadas para a altura da antena do terminal acima de 4m.

Varição da Perda de Percurso em Função da Polarização das Antenas.

Foi possível verificar uma diferença sistemática na perda de percurso, quanto à polarização das antenas. Alguns cuidados foram tomados para que os conjuntos de transmissão e de recepção não viessem a interferir nesse resultado. Na transmissão, as antenas apresentadas na Figura 9 foram previamente analisadas quanto ao seu dimensionamento mecânico e quanto à perda por retorno na faixa de interesse e foram

consideradas idênticas quanto ao seu desempenho. Foram utilizados cabos de mesmo comprimento e mesmas características elétricas, comutados por uma chave coaxial com baixa perda de inserção. A potência entregue às antenas foi medida no seu ponto de conexão e apresentou diferença menor que 0,2 dB. Foi utilizada, no lado de recepção, uma única antena e um único cabo de alimentação, garantindo o mesmo ganho de recepção em ambas polarizações. Portanto, entende-se que os resultados obtidos e relatados na Tabela 10 representam, de fato, uma característica de radioenlaces nessa faixa de frequências.

Tabela 10 - Diferença na perda de percurso em função da polarização das antenas.

Dif H-V (dB)	2m	4m	6m	8m	10m
FA	-4,4	-1,1	-3,3	-1,7	-2,6
SE	-6,1	-2,3	-5,5	-2,0	-1,0
VA	-3,3	-4,1	2,6	-0,8	-1,7
RE	-1,7	-5,0	-4,7	-3,8	-4,5
HO	-2,2	-0,5	-2,7	-4,5	-3,7
Média	-3,5	-2,6	-2,7	-2,6	-2,7

Algumas observações a respeito deste resultado:

- A perda de percurso é sistematicamente maior para a polarização horizontal das antenas.
- A diferença é maior para a altura mais baixa, de dois metros. Isso se deve, bem possivelmente, ao fato do campo elétrico horizontal ser mais suscetível à proximidade com o solo, que o campo elétrico vertical.
- Acima de quatro metros a diferença média da perda de percurso entre as polarizações horizontal e vertical é da ordem de 2,7 dB.

Avaliação da Perda de Percurso Ponto-a-Ponto.

A avaliação da perda de percurso em cinco pontos não oferece dados suficientes para a elaboração de um modelo estatístico. Contudo, algumas avaliações e considerações podem ser feitas, primeiramente por comparação com modelos básicos, como o modelo de Perda no Espaço Livre e o modelo de Dois Raios.

O modelo de Perda no Espaço Livre, para a frequência de interesse (460 MHz) é representado por $PL_{LOS} \text{ (dB)} = 85,7 + 20 \cdot \text{Log}(d)$, para d em km.

O modelo de Dois Raios é representado por $PL_{2R} \text{ (dB)} = 20.\text{Log}(htx) + 20.\text{Log}(hrx) - 40.\text{Log}(d)$, para d em metros, equivalente a $PL_{2R} \text{ (dB)} = 120,44 - 40.\text{Log}(d)$, para $htx = 35\text{m}$, $hrx = 6\text{m}$ e d em km.

É definida uma distância de *Cross-Over* (dc), até a qual é válido o modelo de Perda no Espaço Livre e, a partir da qual, passa a ser válido o modelo de Dois Raios. Essa distância é dada pela relação $dc(\text{m}) = (4.\pi.htx.hrx)/\lambda$. Para $htx = 35\text{m}$, $hrx = 6\text{m}$ e $f = 460\text{MHz}$, $dc = 4050\text{m}$.

A Figura 62 apresenta a perda de percurso para os dois modelos até distâncias de 40 km. Foi adicionada a aproximação pelo modelo aqui denominado de *Non-Line-of-Sight* (NLOS). Esse modelo corresponde à aproximação pela relação genérica $PL_{NLOS} \text{ (dB)} = L_0 + \gamma.10.\text{Log}(d)$, para um valor de erro médio zero. Neste caso, L_0 foi mantido igual ao valor de atenuação a 1 km para modelo de Perda no Espaço Livre. A aproximação foi feita pela relação $PL_{NLOS} \text{ (dB)} = 85,7 + 30,3.\text{log}(d)$, ou seja, para $\gamma = 3,03$.

É conhecido da literatura que o valor de γ varia tipicamente entre 2 e 5, caracterizando o ambiente de propagação como ilustra a Tabela 11. Portanto, o valor de 3,03 caracteriza um ambiente Rural Plano, com ligeira tendência a Rural Acidentado.

Tabela 11 - Valores esperados de γ em função do ambiente.

Ambiente	γ
Espaço Livre	2,0
Rural Plano	3,0
Rural Acidentado	3,5
Urbano	4,0
Urbano Denso	4,5

Os valores de perda de percurso apresentados na Tabela 8 estão apresentados na Figura 63, para a polarização vertical das antenas, e na Figura 64, para a polarização horizontal. Os valores medidos, apresentados nas Figuras 63 e 64, foram aproximados pelo modelo NLOS e essa aproximação está apresentada na Figura 65, para a altura da antena do

terminal de 2m, 6m e 10m. Foi também acrescentada a aproximação NLOS na mesma rota (R1NE), avaliada durante o ensaio móvel.

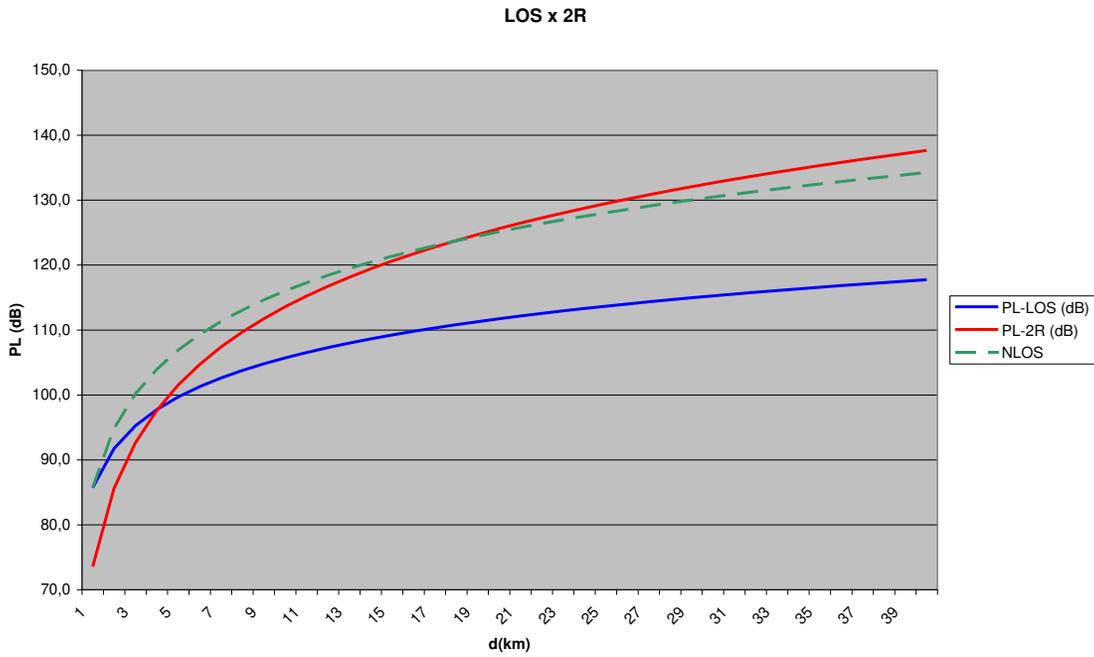


Figura 62 - Perda de percurso LOS x 2R x NLOS

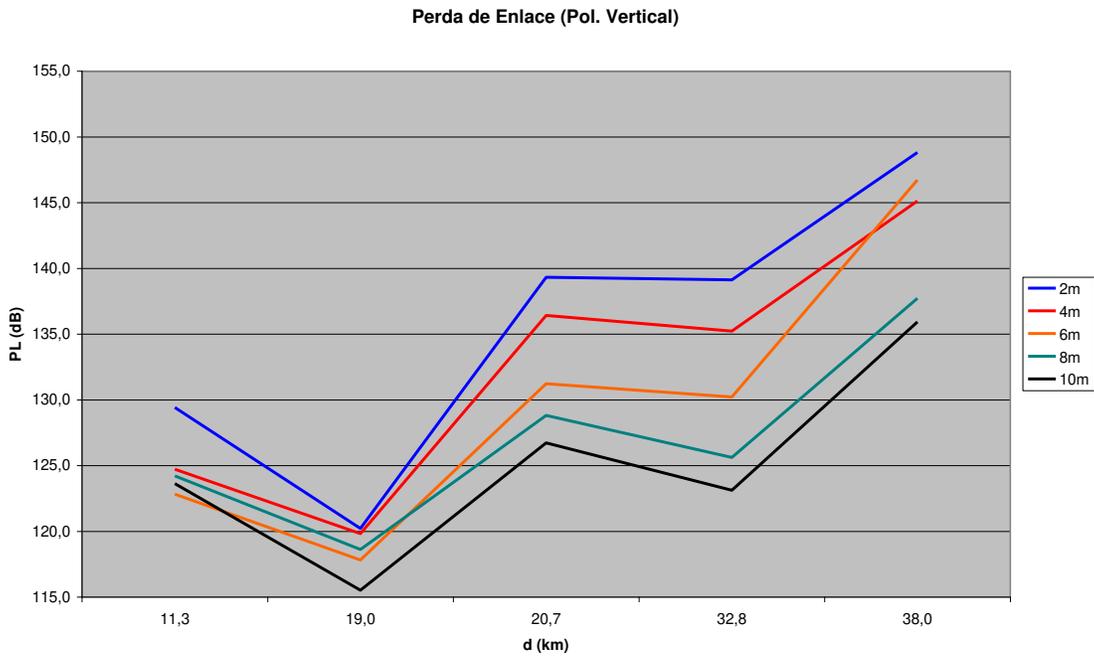


Figura 63 - Perda de percurso na polarização vertical.

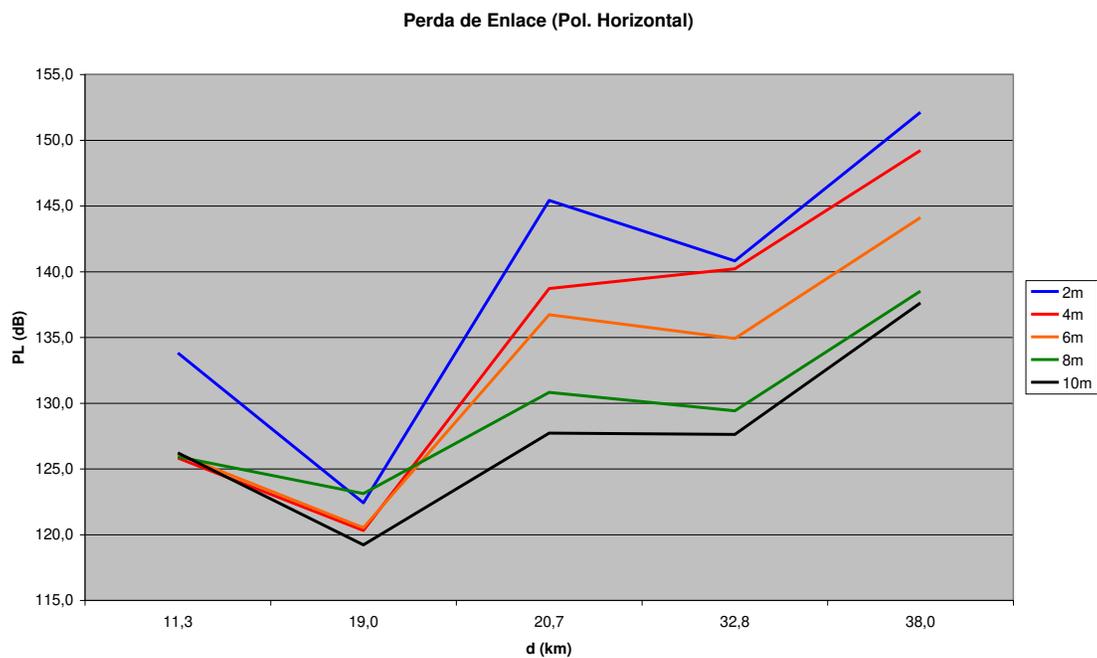


Figura 64 - Perda de percurso na polarização horizontal.

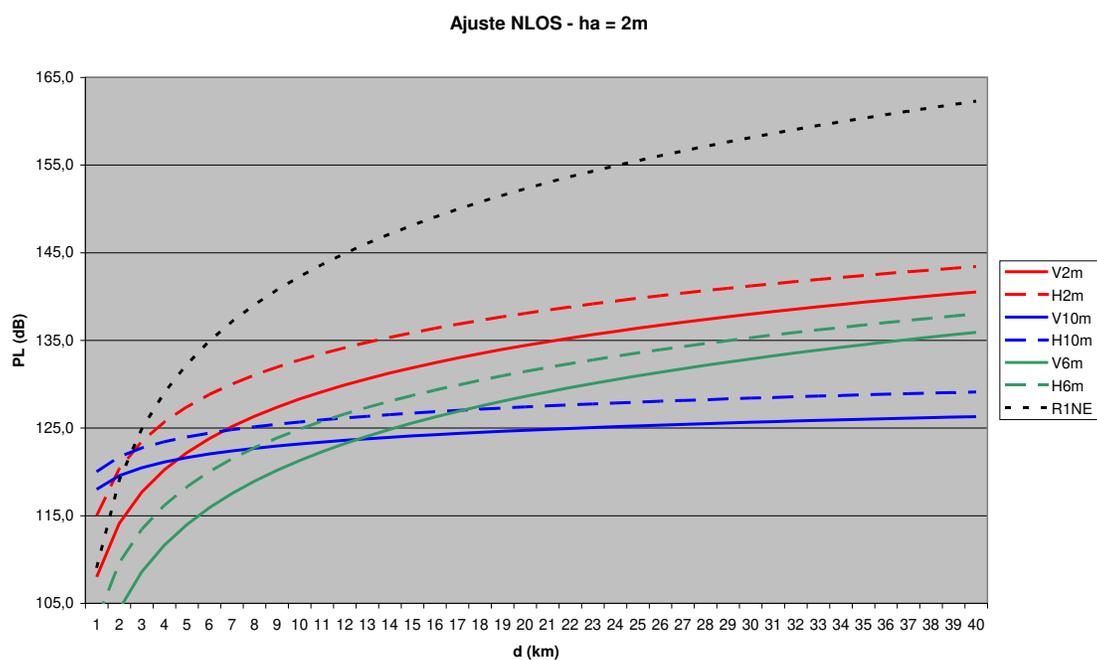


Figura 65 - Aproximação NLOS para os cinco enlaces avaliados em campo para altura da antena do terminal de 2m, 6m e 10m, nas polarizações vertical e horizontal.

A aproximação NLOS apresentada na Figura 65 retornou valores variados de γ , conforme apresentado na Tabela 12 e Figura 66.

Tabela 12 - Valores de γ obtidos na aproximação NLOS das medições ponto-a-ponto.

ha (m)	GamaV	GamaH	GamaM
2	2,030	1,774	1,902
4	2,540	3,104	2,822
6	2,429	2,186	2,307
8	0,964	1,524	1,244
10	0,518	0,569	0,544

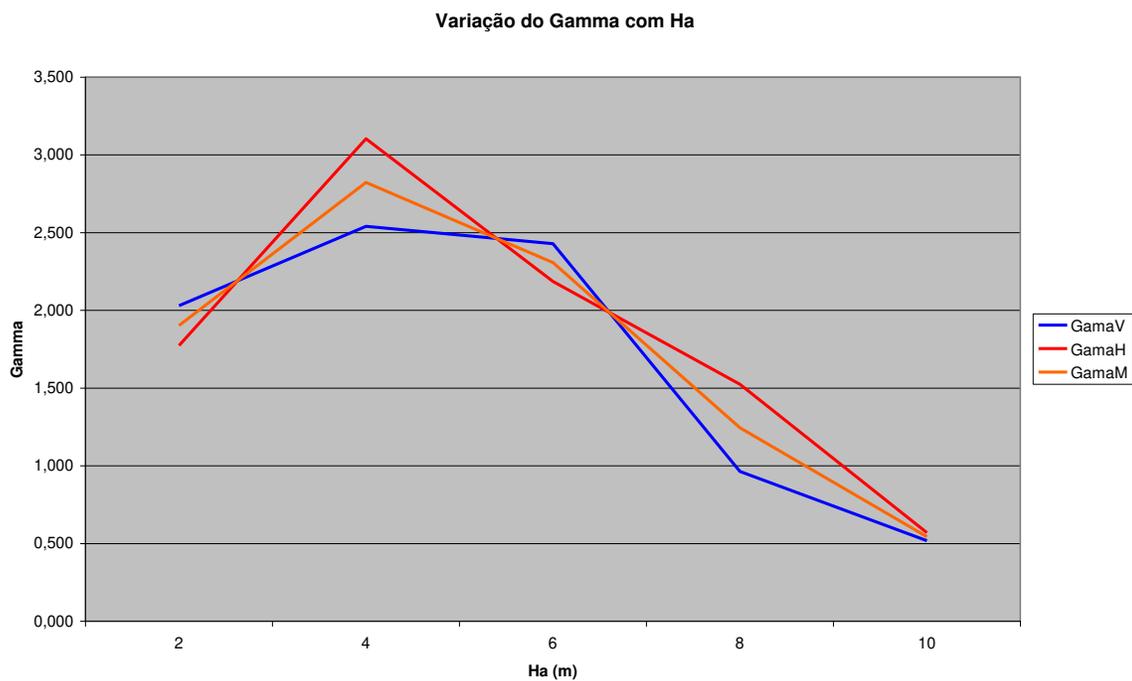


Figura 66 - Distribuição dos valores de γ em relação à altura da antena do terminal, obtidos na aproximação NLOS dos valores de perda de percurso nas medições ponto-a-ponto.

Segundo valores característicos para a aproximação NLOS, apresentados na Tabela 11, pode-se dizer que os valores de γ obtidos estão dentro da faixa esperada, entre 2 e 3, para a altura da antena do terminal entre 2m e 6m. Para alturas da antena do terminal acima de 6m o modelo não se aplica, uma vez que o menor valor possível de γ é 2,0, quando a propagação se dá em espaço livre (LoS).

Discriminação de polarização no ponto de recepção (terminal).

A Figura 67 apresenta os resultados de discriminação de polarização nos cinco pontos de recepção. Nessa figura são apresentados os dados conforme medidos e uma aproximação linear mostrando a tendência de cada situação. A curva Disc(V-H) (azul) corresponde à polarização vertical a partir do Ponto de Transmissão e a curva Disc(H-V) (vermelha) corresponde à polarização horizontal a partir do Ponto de Transmissão.

Como era de se esperar, a discriminação de polarização cai com a distância, devido às reflexões e difrações acumuladas ao longo do percurso. Foram obtidos valores de discriminação de polarização entre 10 dB e 35 dB, contudo, um valor característico de 20+/-5 dB parece ser aceitável.

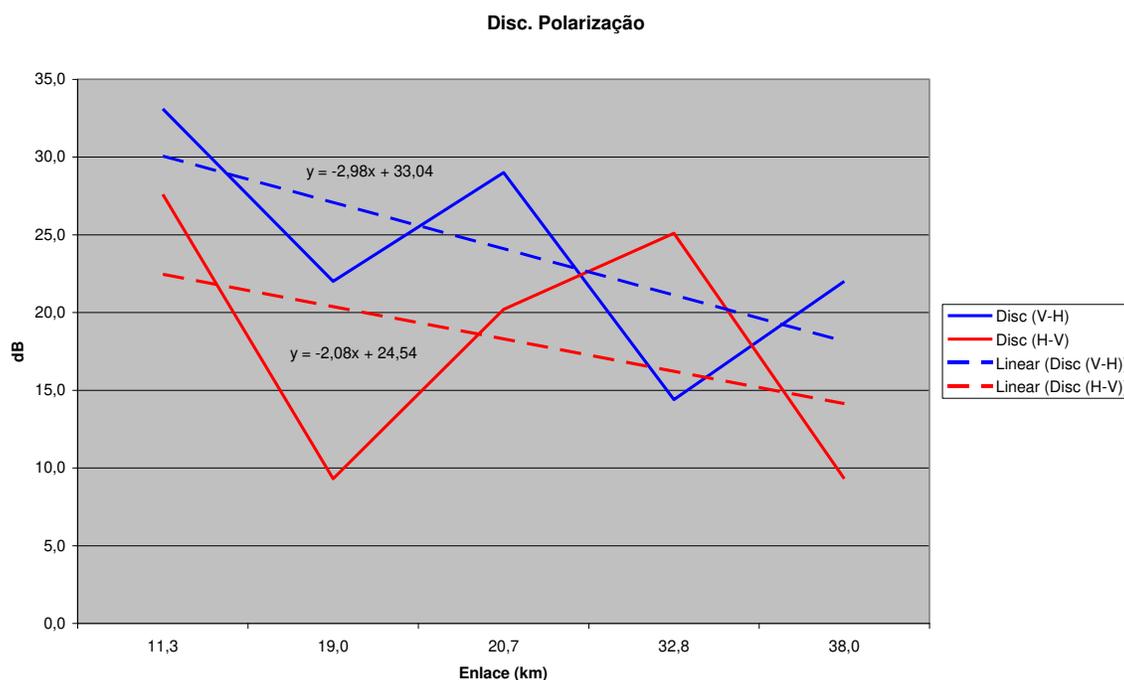


Figura 67 - Discriminação de polarização nos cinco pontos avaliados.

CAPÍTULO 4 - ANÁLISE DOS MODELOS DE PROPAGAÇÃO.

Neste capítulo serão analisados os dois modelos de propagação selecionados para a avaliação dos resultados obtidos em campo. São eles:

- *Prediction of Tropospheric Radio Transmission Loss Over Irregular Terrain - A Computer Method* - Longley A. G. and Rice P. L.[5].
- ITU-R P.1812-2, *A path-specific propagation prediction method for point-to-area terrestrial services in the VHF and UHF bands*, 02/2012 [9].

O primeiro modelo, também conhecido como ITM – *Irregular Terrain Model*, data dos anos 60 e corresponde à primeira tentativa de implementação computacional de um modelo para predição de propagação nas faixas de VHF e UHF. Já o segundo é um modelo internacionalmente aceito como referência para cálculos de propagação, interferência e convivência entre sistemas de radiocomunicação.

Apesar de o modelo ITU-R ser mais completo e detalhado que o modelo *Longley-Rice* original, este segundo foi mantido neste estudo por ter sua implementação em software disponível em várias plataformas. Já o modelo recentemente publicado pela ITU-R tem sua implementação em software realizada apenas em aplicativos comerciais cujo custo inviabiliza sua aplicação neste trabalho.

Não é objetivo deste trabalho executar uma análise profunda da modelagem aplicada pelos dois modelos. A análise aqui realizada objetiva unicamente a aplicação de um desses modelos na validação dos dados de perda de percurso obtidos durante os ensaios de campo.

4.1 - ANÁLISE DO MODELO *LONGLEY-RICE*.

Durante o início dos anos 60, muitos estudos acerca da propagação das ondas eletromagnéticas foram desenvolvidos nos Estados Unidos e Europa para modelar o comportamento dos sinais das emissoras de rádio e televisão. Nesse período, Barsis & Miles [10] realizaram medições nas faixas de 20, 50, e 100 MHz. Para esses estudos as

informações do perfil do terreno eram disponíveis para um enlace específico, de maneira que as distâncias até o horizonte ótico, os ângulos de elevação e a distância angular entre as estações podiam ser calculados diretamente. Não era possível uma previsão de cobertura ponto-área, porque nem todos os perfis estavam disponíveis, logo, esses parâmetros deveriam ser calculados estatisticamente. Esses estudos apresentavam limitações, pois necessitavam de um modelo melhor para as variáveis aleatórias de atenuação quando o enlace deixasse de ser fixo e assumisse mobilidade. Portanto, era necessário obter-se um modelo parametrizado para a representação do perfil do relevo em substituição às inexistentes, até então, bases de dados de terrenos.

Em 1963, Barsis & Rice apresentaram o relatório acima referenciado que descreveu um modelo de cobertura de sinais de rádio sobre vários tipos de terreno. Esses estudos progrediram e foi estabelecido um parâmetro de rugosidade do terreno (Δh) para caracterizar estatisticamente tais irregularidades conforme observado na Tabela 13 a seguir:

Tabela 13 – Parâmetro de Irregularidade do Terreno (Δh)

Tipo do Terreno	Parâmetro de Irregularidade do Terreno
Liso (ou sobre a água)	0
Planície	30
Colinas	90
Serras	200
Montanhas	500

No trabalho original desses autores, para determinar Δh em uma área determinada nos Estados Unidos, um grande número de perfis foram avaliados em intervalos uniformes. O valor médio encontrado em cada distância foi utilizado para obter uma curva suave sobre o continente. O resultado parcial deste trabalho pode ser observado na Figura 68 a seguir:

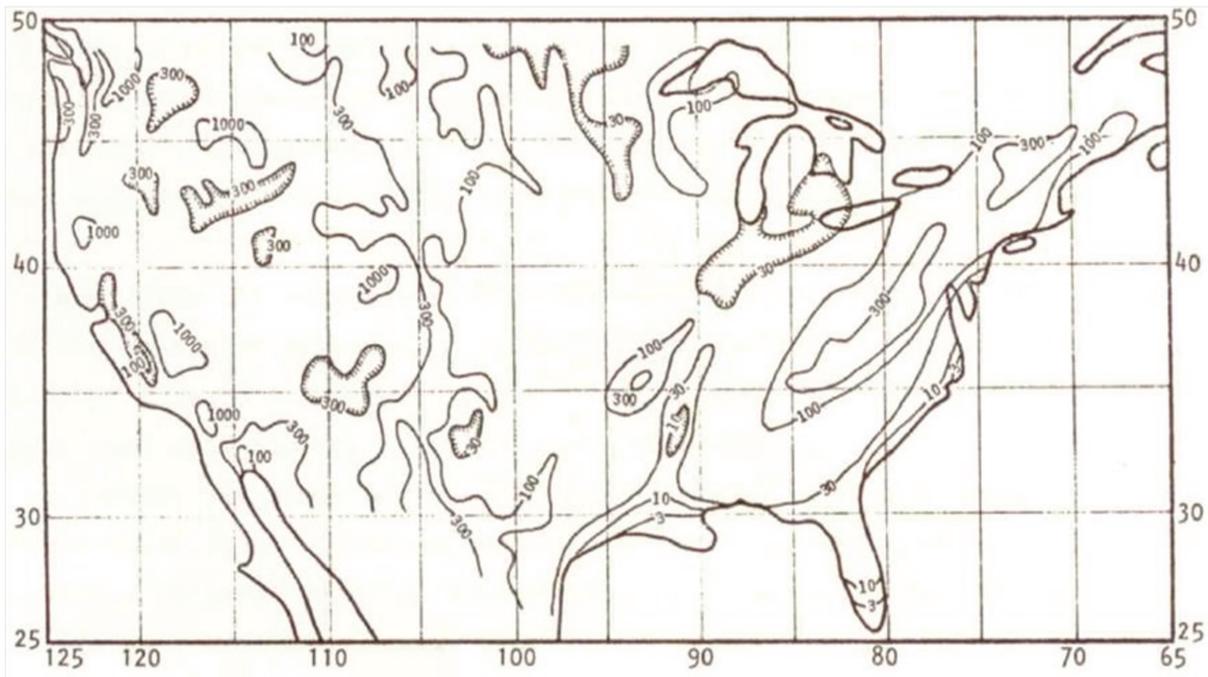


Figura 68 – Curvas de Rugosidade (Δh) de Terreno nos EUA [10].

Nessa área, a interdeclividade, ou irregularidade do terreno, foi determinada com o parâmetro $\Delta h(d)$ dada pela equação 4.1, onde a distância de referência (D_0) equivale a 50 km e a distância entre níveis de irregularidade (d) depende de cada tipo de terreno.

$$\Delta_h(d) = \Delta_h \left(1 - 0,8 \exp \left(-\frac{d}{D_0} \right) \right) \quad [4.1]$$

Longley e Rice avaliaram um grande número de perfis de terreno para diferentes distâncias e descobriram que, onde o terreno não é homogêneo, ocorre uma dispersão maior de valores do parâmetro Δh e seu valor estimado não pode ser representado por uma média de cada trecho. Em tais circunstâncias, é necessário prever maior variabilidade na localização da estação, ou considerar diferentes setores de uma área e prever um Δh para cada setor. Um exemplo disso seria uma área que inclui planícies, serras e montanhas. As perdas previstas para cada setor poderiam ser determinadas pelo valor do parâmetro calculado para essa área como um todo. Além disso, realizaram a análise do comportamento da propagação dos sinais de estações de rádio em diferentes tipos de terrenos e observaram o mesmo comportamento na faixa de 20 MHz a 20 GHz.

Ao considerar a irregularidade do terreno, os pesquisadores também identificaram outras variáveis que também contribuía com a atenuação do sinal medido. Essas variáveis aleatórias estavam relacionadas com a variabilidade no tempo (Y_T), de localização (Y_L) e de situação (Y_S) na qual a estação móvel estava sujeita. Segundo o modelo, o sinal recebido por uma estação móvel é obtido pelo nível de sinal transmitido, atenuado no espaço livre (W_0) e pelo somatório da atenuação decorrente das variáveis aleatórias que totalizam uma atenuação de referência (W_{ref}), conforme mostra a equação 4.2.

$$W_{ref}(dB) = W_0 + \delta_S Y_S + \delta_T Y_T + \delta_L Y_L \quad [4.2]$$

Longley e Rice apresentaram este modelo baseado em um programa computacional capaz de calcular o somatório das atenuações dessas variáveis, juntamente com a contribuição da irregularidade do terreno. A descrição matemática de cada uma dessas variáveis é bastante complexa e está disposta no trabalho de Hufford [11].

Para o cálculo da atenuação de referência (W_{ref}) são utilizados os modos de predição ponto-área ou ponto-a-ponto. No modo ponto-área é considerada a variabilidade de localização das estações em uma área. No modo ponto-a-ponto, o cálculo da atenuação de referência considera as distâncias conhecidas entre as estações transmissora e receptora, além das distâncias onde se iniciam os fenômenos da difração e espalhamento.

Inicialmente, o modelo calcula a atenuação de espaço livre (W_0) definida pela equação 4.3.

$$W_0(dB) = 20 \log \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right) \quad [4.3]$$

Em seguida, o modelo calcula a perda de percurso entre as estações, onde ocorrem três regiões de atenuação distintas: Linha de Visada (A_{los}), Difração (A_{dif}) e Espalhamento (A_{es}).

Nestas três regiões de atenuação também ocorrem os efeitos aleatórios de situação Y_S , localização Y_L e tempo Y_T , como pode ser visto nas equações 4.4, 4.5 e 4.6.

$$W_{ref}(dB) = W_0 + A_{los} + (Y_L + Y_S + Y_T), \text{ para } d < d_{Lb} \quad [4.4]$$

$$W_{ref}(dB) = W_0 + A_{dif} + (Y_L + Y_S + Y_T), \text{ para } d_{Lb} < d < d_{Lm} \quad [4.5]$$

$$W_{ref}(dB) = W_0 + A_{es} + (Y_L + Y_S + Y_T), \text{ para } d_{Lm} < d \quad [4.6]$$

A atenuação nesses trechos é obtida a partir da análise da geometria do enlace conforme mostra a Figura 69. Neste cálculo são consideradas a altura da antena transmissora (h_b), receptora (h_m), altura efetiva (estrutura + elevação do perfil) da antena transmissora (h_{eb}), antena receptora (h_{em}), a distância entre as estações (d), o horizonte de rádio da antena transmissora (d_{Lb}), o horizonte de rádio da antena receptora (d_{Lm}), os ângulos de elevação do horizonte de rádio da antena transmissora (θ_{eb}), da antena receptora (θ_{em}) e do cruzamento dos horizontes de rádio das antenas transmissora e receptora (θ_e).

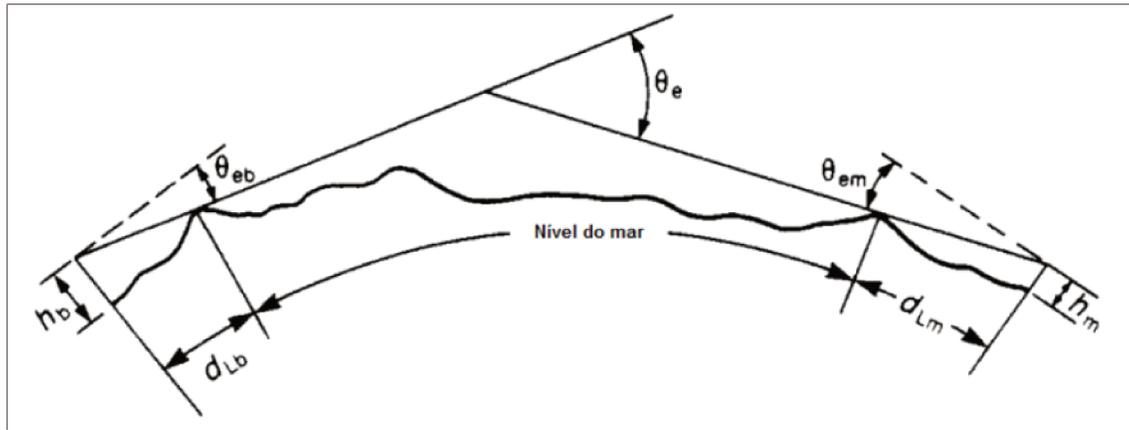


Figura 69 – Atenuação por trechos utilizada no modelo *Longley-Rice*.

Assim, os coeficientes de atenuação A_{los} , A_{dif} e A_{es} , podem ser determinados a partir das equações 4.7, 4.8 e 4.9, sendo a frequência (f) dada em MHz, o comprimento de onda (λ) dado em metros, as alturas das antenas e as distâncias em quilômetros, e os ângulos em radianos:

$$A_{los} = 20 \text{LOG} \left(1 + \frac{(d_{Lb} + d_{Lm}) \Delta h}{h_{eb} h_{em}} \right) \quad [4.7]$$

$$A_{dif} = \left(1 + 0,045 \left(\frac{\Delta h}{\lambda} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{a \theta_e + (d_{Lb} + d_{Lm})}{d} \right)^{\frac{1}{2}} \right)^{-1} \quad [4.8]$$

onde:

$$a = \frac{6370}{(1 - 0,04665 \exp(0,005577 N_s))}$$

$$A_{es} = H_0 + 10 \log(f \theta_e^4) - 0,1(N_s - 301) \exp\left(\frac{-\theta_e d}{40}\right) \quad [4.9]$$

onde:

$$H_0 = \frac{(h_{eb}^{-1} h_{em}^{-1})}{\theta_e f |0,007 - 0,058 \theta_e|}$$

Caso a localização de uma estação não seja conhecida, o cálculo da atenuação devida a variabilidade de localização da estação em uma área deve seguir a proposição de Hufford [11], considerando o número de onda ($k=2\pi f$) e a distância entre as estações (d) em função da irregularidade do terreno (Δh), conforme a equação 4.10.

$$Y_L = \frac{10k\Delta h(d)}{k\Delta h(d)+13} \quad [4.10]$$

O efeito das mudanças aleatórias de cenário é denominado de variabilidade de situação (Y_s), sendo definido a partir de uma distância de referência ($D=100$ km) e a distância efetiva entre as estações (d_e), como explicitado na equação 4.11.

$$Y_s = 5 + 3 \exp\left(\frac{-d_e}{D}\right) \quad [4.11]$$

Para determinação da atenuação em função da variabilidade de tempo (Y_T) é necessário avaliar a Figura 70, considerando a distância (d) entre as estações e os valores correspondentes para a atenuação em cada tipo de clima proposto no modelo original.

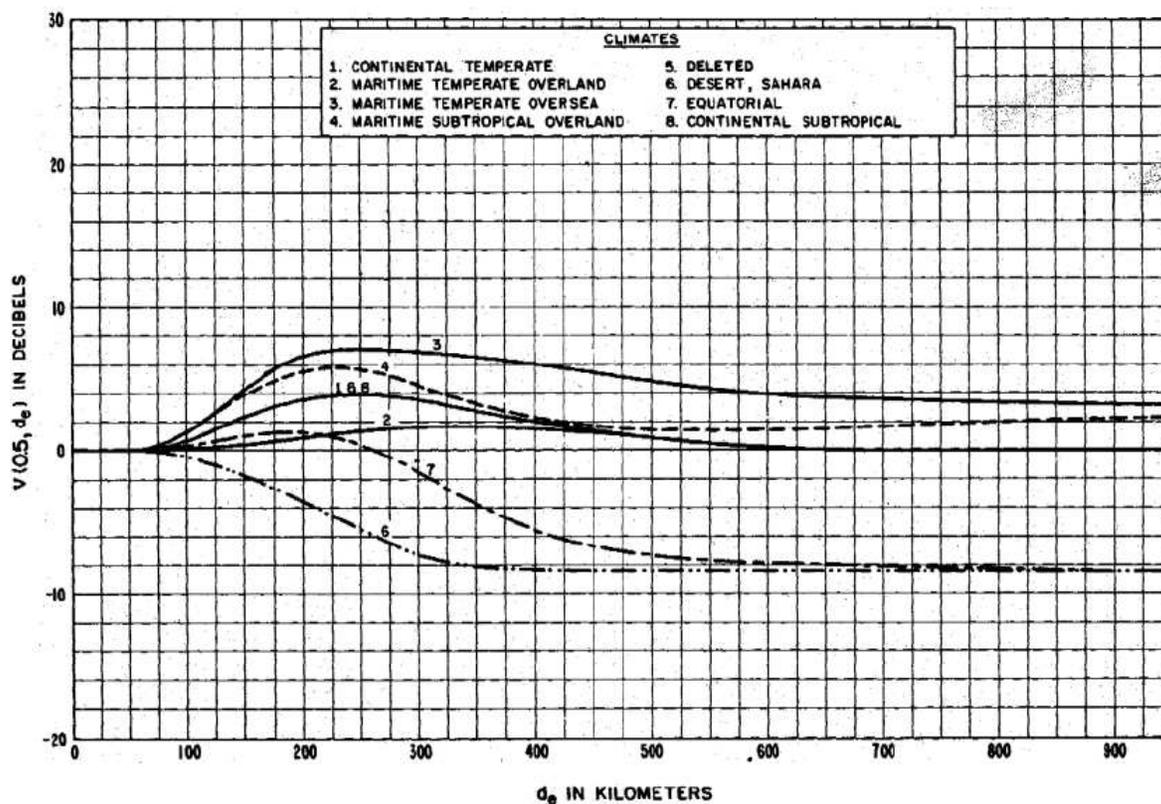


Figura 70 – Parâmetros para avaliação da variabilidade no tempo Y_T .

Por fim, a análise da atenuação devida às variáveis de localização (Y_L), situação (Y_S) e tempo (Y_T), somadas às atenuações de espaço livre (W_0), linha de visada (A_{los}), difração (A_{dif}) e espalhamento (A_{es}) permitem a compreensão do modelo *Longley-Rice* e a formulação de um modelo computacional.

Uma implementação do modelo computacional é representada pelo programa *Radio Mobile* [7], que será utilizado para as comparações entre os dados obtidos nos ensaios de campo e aqueles referentes às previsões do modelo *Longley e Rice*.

4.2 - ANÁLISE DO MODELO ITU-R P.1821-2.

A recomendação ITU-R P.1812-2 - *A path-specific propagation prediction method for point-to-area terrestrial services in the VHF and UHF bands* [9], é definida pela própria ITU-R como um método de previsão de propagação adequado para serviços ponto-área terrestres na faixa de frequência de 30 MHz a 3 GHz. Ele prevê níveis de sinal, para uma distribuição multipercurso média, que exceda um determinado valor em uma dada porcentagem de tempo, $p\%$ ($1\% \leq p \leq 50\%$) e uma determinada porcentagem de lugares, PL ($1\% \leq pL \leq 99\%$). O método proporciona uma análise detalhada com base no perfil do terreno e é adequado para previsões em sistemas de radiocomunicação que utilizam circuitos terrestres com enlaces de 0,25 km até cerca de 3000 km de distância, com ambos os terminais com antenas até 3 km de altura acima do solo. Não é adequado para previsões de propagação Ar-Terra ou circuitos de rádio Espaço-Terra.

Este método de previsão de propagação é destinado a percursos específicos. As previsões ponto-a-área utilizando este método consistem em uma série de diversas previsões ponto-a-ponto distribuída uniformemente sobre as áreas de serviço. O número de pontos deve ser suficientemente grande para garantir que os valores previstos de perdas de transmissão, ou de intensidades de campo, assim obtidos sejam razoáveis estimativas dos valores médios, no que diz respeito às áreas elementares que representam. Em consequência, presume-se que estejam disponíveis perfis de terreno detalhados (bases de dados), ao longo dos caminhos entre as estações.

Este método de previsão de propagação leva em conta os seguintes elementos do modelo:

- Linha de Visada (LOS)
- Difração
- Dispersão troposférica
- Propagação anômala (dutos e camadas de reflexão/refração)
- Variação de ganho com a altura em um *clutter*
- Variabilidade local
- Perdas de penetração em edifícios.

A Tabela 14 apresenta os dados de entrada, que definem os terminais, a frequência e o porcentual de tempo e locais para os quais é necessária uma previsão.

A latitude e a longitude das duas estações são apresentadas como insumos básicos já que eles são necessários para obter o perfil do enlace. Os parâmetros meteorológicos devem ser obtidos para um único local associado ao enlace rádio. Para um enlace longo o trecho central deve ser selecionado.

Tabela 14 - Dados de entrada

Parâmetro	Unidade	Mínimo	Máximo	Descrição
f	GHz	0.03	3.0	Frequência (GHz)
p	%	1.0	50.0	Porcentagem média anual em que o nível de sinal é excedido.
p_L	%	1	99	Porcentagem das localizações para as quais o nível de sinal calculado é excedido.
φ_t, φ_r	graus	-80	+80	Latitude do transmissor e do receptor.
ψ_t, ψ_r	graus	-180.0	180.0	Longitude do transmissor e do receptor. (positivo = Leste de Greenwich)
h_{tg}, h_{rg}	m	1	3 000	Altura do centro da antena em relação ao nível do solo.

Um perfil do terreno para o enlace rádio é necessário para a aplicação do método de previsão de propagação. A princípio, o perfil de terreno é composto por três vetores, cada uma tendo o mesmo número n de valores, como a seguir:

- d_i : distância do transmissor até o i -ésimo ponto (km)
- h_i : altitude acima do nível do mar do i -ésimo ponto (m)
- $g_i = h_i +$ altura do i -ésimo ponto representante do *clutter* (m)

A "altura do ponto representante do *clutter*", referido na equação acima, refere-se à cobertura do solo (morfologia), como vegetação e edifícios. Adicionar alturas de *clutters* a um perfil baseia-se no pressuposto de que as alturas h_i representam a superfície nua da Terra. Se o enlace rádio passa por floresta ou urbanização, onde ocorre difração por obstrução, em geral, a altura do perfil efetivo será maior porque o sinal de rádio vai atravessar o *clutter*. Assim, uma representação mais precisa do perfil pode ser obtida por adição de alturas para se levar em conta os *clutters*.

A adição não é necessariamente física, como alturas do telhado no caso de edifícios. Onde existem espaços entre objetos do *clutter*, como pode ser visto pela onda de rádio, um pouco de energia pode viajar entre eles, em vez de sobre eles. Nesta situação, se espera que a presença do *clutter* aumente a perda por difração, mas não tanto como o simples aumento da altura do perfil pela altura física do *clutter*. Assim, a altura representativa do *clutter* R depende não só a altura dos objetos, mas também do espaçamento horizontal de objetos e os espaços entre eles. A Tabela 15 mostra os valores para R , que podem ser utilizados na ausência de informação mais específica da região.

Tabela 15 - Informação para o modelamento de perda em *clutters*

Tipo	Altura representativa do <i>clutter</i> (m)	
	Adicionar à equação de perfil	Perda no <i>clutter</i> terminal
Água/Mar	0	10
Aberto/Rural	0	10
Suburbano	10	10
Urbano/Árvores/Floresta	15	15
Urbano Denso	20	20

A Tabela 16 apresenta as características das três zonas radio-climáticas definidas para o modelo. Se todos os pontos do percurso estiverem a pelo menos 50 km do mar, ou de outras grandes massas de água, apenas a categoria Interior se aplica.

Tabela 16 - Zonas rádio-climáticas

Tipo	Código	Definição
Costa	A1	Terras costeiras e áreas da costa, ou seja, a terra adjacente ao mar até uma altitude de 100 m em relação ao nível médio do mar ou de grandes massas de água, mas limitado a uma distância de 50 km da área de mar mais próximo.
Interior	A2	Toda a terra, para além das zonas costeiras e margens definidas acima como "terra costeira".
Mar	B	Mares, oceanos e outras grandes massas de água (abrangendo um círculo de pelo menos 100 km de diâmetro).

O grau em que o nível de sinal será aumentado devido à propagação anômala por efeito de dutos é quantificada pelo parâmetro β_0 (%), ou seja, a porcentagem de tempo durante o qual o índice de refração é superior a 100 N-units/km, prevista para os primeiros 100 m da atmosfera inferior. O valor de β_0 é calculado como se segue, pelas equações 4.12 a 4.15 .

$$\beta_0 = \begin{cases} 10^{-0.015|\varphi| + 1.67} \mu_1 \mu_4 & \% & \text{for } |\varphi| \leq 70^\circ \\ 4.17\mu_1 \mu_4 & \% & \text{for } |\varphi| > 70^\circ \end{cases} \quad [4.12]$$

Onde:

$$\begin{aligned} \mu_4 &= \mu_1^{(-0.935 + 0.017|\varphi|)} && \text{for } |\varphi| \leq 70^\circ \\ \mu_4 &= \mu_1^{0.3} && \text{for } |\varphi| > 70^\circ \end{aligned} \quad [4.13]$$

Para:

φ : latitude central do percurso (graus).

$$\tau = 1 - e^{-\left(4.12 \times 10^{-4} \times d_{lm}^{2.41}\right)} \quad [4.14]$$

d_{lm} : maior seção contínua de terra do percurso (interior + costa) (km)

d_{lm} : maior seção contínua de terra do percurso (km).

$$\mu_1 = \left(10^{\frac{-d_{lm}}{16 - 6.6\tau}} + 10^{-5 \cdot (0.496 + 0.354\tau)} \right)^{0.2} \quad [4.15]$$

Onde o valor de μ_1 está limitado a $\mu_1 \leq 1$.

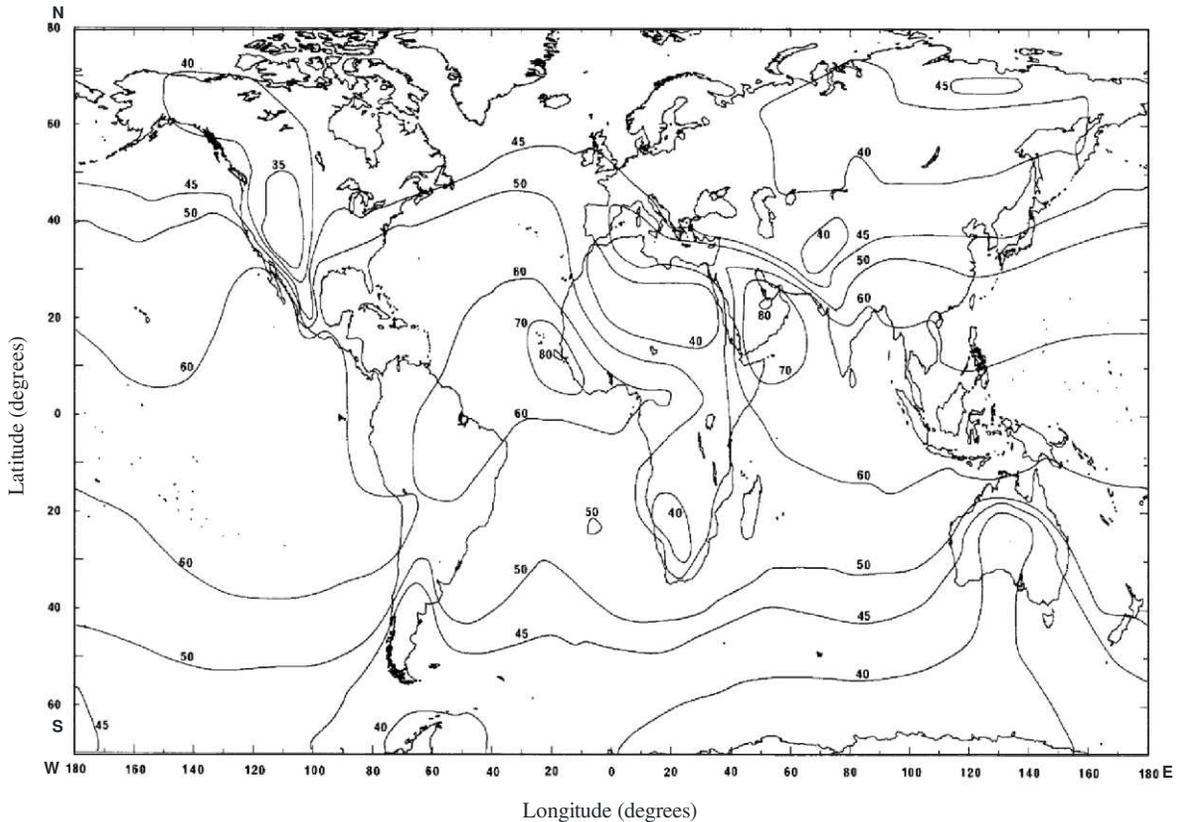
O valor médio do raio efetivo da Terra a_e é dado pelas equações 4.16 e 4.17:

$$a_e = 6371 \cdot k_{50} \text{ km} \quad [4.16]$$

Onde:

$$k_{50} = \frac{157}{157 - \Delta N} \quad [4.17]$$

O valor da rádio-refratividade média ΔN pode ser obtido a partir da fig. 1, usando a latitude e longitude do centro do percurso como representante de todo o caminho.



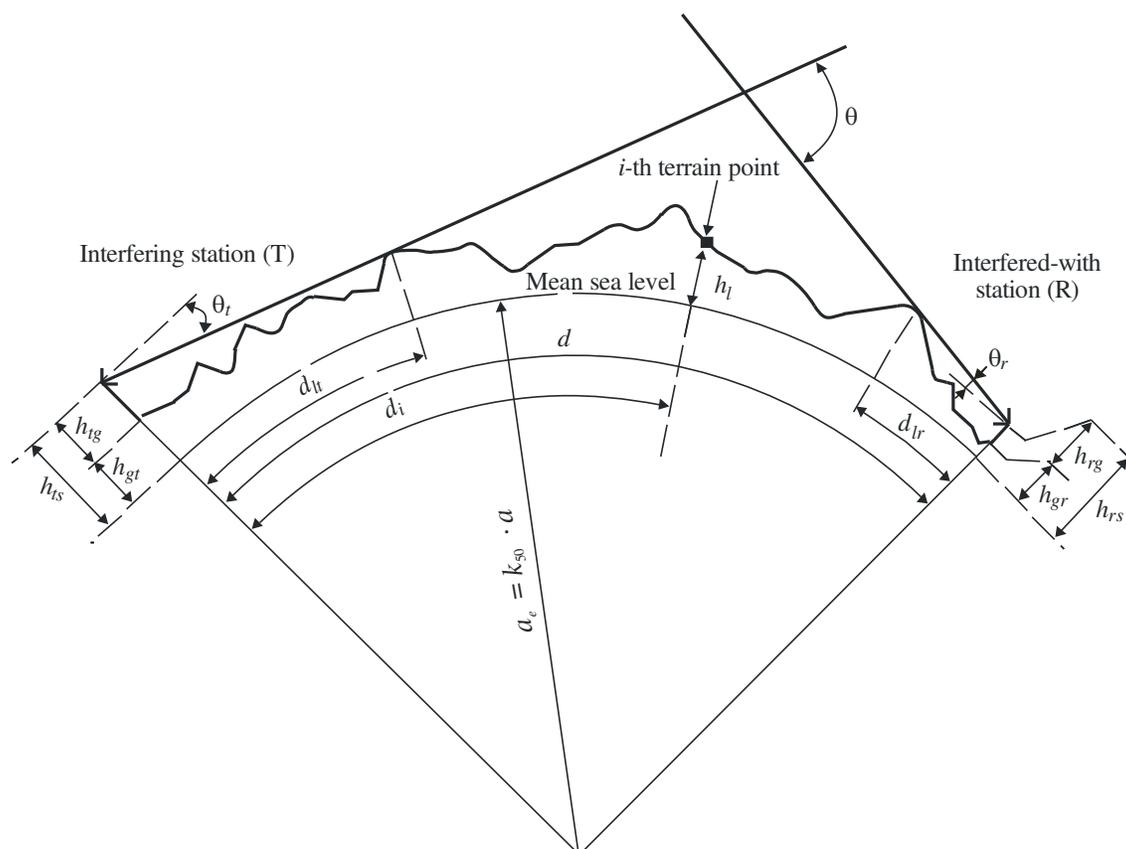
P.1812-01

Figura 71 - Valores médios anuais de ΔN , N-units/km

Além dos parâmetros acima referenciados, como aqueles que caracterizam a morfologia, o ambiente rádio-climático e a propagação anômala causada por dutos atmosféricos, é necessário adicionar os parâmetros decorrentes da análise do perfil do enlace, tal como indicado na Tabela 17. Esses parâmetros têm como base o valor de a_e dada pela equação [4.16] e estão detalhados na Figura 72 .

Tabela 17 - Valores dos parâmetros derivados da análise do perfil do enlace

Parâmetro	Descrição
d	Distância total do enlace (km)
d_{it}, d_{ir}	Distância das antenas de transmissão e recepção de seus respectivos horizontes óticos (km)
θ_t, θ_r	Ângulo de elevação dos horizontes óticos de transmissão e recepção (mrad)
θ	Distância angular do enlace (mrad)
h_{ts}, h_{rs}	Altitude do centro das antenas em relação ao nível do mar (m)
h_{tc}, h_{rc}	$\max(h_{ts}, g_1)$ and $\max(h_{rs}, g_n)$ respectivamente
h_{te}, h_{re}	Altura efetiva das antenas em relação ao nível do solo (m)
d_b	Comprimento agregado da porção do enlace que acontece sobre o mar (km)
ω	Fração do enlace que acontece sobre o mar. $\omega = d_b / d$ Onde d é o comprimento do enlace (km). Para enlaces sobre a terra: $\omega = 0$



Note 1 – The value of θ , as drawn will be negative.

P1812-03

Figura 72 – Parametrização do Perfil do Enlace, conforme recomendação ITU-R P.1812-2.

Com todos os parâmetros relativos ao enlace e ambientais pré-estabelecidos, o processo de predição é realizado através dos seguintes cálculos de atenuação:

- Linha de Visada (Los).
- Por difração.
 - Pelo método de *Bullington*.
 - Da Terra esférica.
 - Pelo modelo "*Delta-Bullington*".
 - Que não excedeu a p% do tempo.
- Dispersão troposférica.
- Por dutos.
- Total da atenuação que não excedeu o valor em p% do tempo e 50% locais, ignorando os efeitos do *clutter* do terminal.
- Adicional devido ao ambiente do terminal.
- Adicional devido a variabilidade de localização.
- Adicional por penetração em edifícios.
- Totalização da Perda de Percurso que não excedeu o valor em p% do tempo e para e pL% locais.

4.3 - CONCLUSÕES SOBRE A ANÁLISE DOS MODELOS DE PROPAGAÇÃO.

Foram analisados dois modelos de propagação mais utilizados para a predição de cobertura ponto-área e de enlaces ponto-a-ponto, nas faixas de VHF e UHF. Os dois modelos podem ser considerados analíticos, a despeito de aplicarem considerações estatísticas quanto à variabilidade de tempo, local e situação, porque segmentam o enlace em trechos de propagação em linha de visada, com difração tipo gume-de-faca e por tropodifusão. Em cada um desses trechos são aplicadas modelagens geométricas para a propagação da frente de onda.

O modelo *Longley-Rice*, datado da década de 60, apresenta bons resultados apesar de não considerar todos os aspectos tratados pelo modelo ITU-R. Porém, por ser um modelo mais exercitado ao longo dos últimos cinquenta anos, dispõe de várias

implementações computacionais *freeware* e está bastante sedimentado e validado. Nesse período, esse modelo recebeu apenas a adição do Fator Urbano, para que a propagação em regiões urbanas pudesse ser realizada.

O modelo ITU-R, por sua vez, mostra-se como um modelo mais elaborado e refinado. Além dos parâmetros e condições de propagação tratados pelo modelo *Longley-Rice*, o modelo ITU-R considera o tratamento da morfologia, através da adição à altitude do perfil da altura representativa do *clutter*, a propagação anômala por dutos atmosféricos e a perda adicional por penetração em prédios. Entretanto, não foram encontradas implementações computacionais disponibilizadas como *freeware*, a exemplo das encontradas para o modelo *Longley-Rice*, apenas implementações comercializadas a um preço que inviabiliza sua utilização neste trabalho.

Considerando a análise realizada e as condições práticas disponíveis, o modelo *Longley-Rice*, através da implementação computacional *Radio Mobile*, foi utilizado para a validação das medições de campo da perda de percurso.

CAPÍTULO 5 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE PREDIÇÃO E DE CAMPO

Neste capítulo serão realizadas previsões de cobertura ponto-área e de enlaces ponto-a-ponto utilizando-se o modelo *Longley-Rice*, implementado pelo software *Radio Mobile*. Os resultados de previsão utilizam dados de entrada das estações fixas e móvel, dos Ensaios Fixo e Móvel, de tal forma a tornar possível a comparação com os resultados obtidos em campo. Ao final, algumas considerações são feitas a respeito da aplicabilidade do modelo e de sua parametrização.

A previsão inicial em cada caso é realizada com parametrização *default* do modelo. Essa parametrização é definida na opção “Propriedades de Rede” do aplicativo, como mostrado na Figura 73.



Figura 73 – Parametrização Default das Propriedades de Rede

Em algumas situações os parâmetros de “% de Situações” e “Perda Adicional por Floresta” foram ajustados para se encontrar o menor desvio entre a previsão e os valores obtidos em campo.

Os trechos selecionados dentre aqueles medidos nos Ensaios Móvel e Fixo são os seguintes:

Ensaio Móvel:

- Ponto de Transmissão (PTx-Móvel):
 - Localização: Torre do laboratório de antenas do CPqD.
 - Coordenadas: 22° 49' 02,11''S / 47° 02' 49,66''O.
 - Antena: Omnidirecional com Ganho = 11,15 dBi.
 - Perda em cabos e conectores = 1,8 dB.
 - Altura da antena: 35 m acima do nível do solo.
 - Altitude: 644 m acima do nível do mar.
 - Potência (e.i.r.p.) = 48,1 dBm e 55,4 dBm.
- Unidade Móvel (UM):
 - Antena: Omnidirecional com Ganho = 6 dBi.
 - Perda em cabos e conectores = 1 dB.
- Rota 1 Norte (R1N):
 - Localização: Entre PTx-Móvel e Acesso de Mogi Mirim.
 - Azimute: 010°.
 - Coordenadas: 22° 28' 31,8''S / 46° 58' 31,8''O.
 - Distância: 38,6 km.
- Rota 2 Sudoeste (R2SO):
 - Localização: Entre PTx-Móvel e Rodovia Bandeirantes.
 - Azimute: 226°.
 - Coordenadas: 22° 52,8' 40''S / 47° 07' 54,92''O.
 - Distância: 12km.
- Rota 4 Sudeste (R4SE):
 - Localização: Entre PTx-Móvel e Rodovia D. Pedro I.
 - Azimute: 138°.
 - Coordenadas: 22° 55' 54,4''S / 46° 56' 8,24''O.
 - Distância: 17,1 km.

Ensaio Fixo:

- Ponto de Transmissão (PTx-Fixo):
 - Localização: Torre do laboratório de antenas do CPqD.
 - Coordenadas: 22° 49' 02,11''S / 47° 02' 49,66''O.

- Antena: Yagi (H e V) com Ganho = 11,8 dBi.
- Perda em cabos e conectores = 1,8 dB.
- Altura da antena: 35 m acima do nível do solo.
- Altitude: 644 m acima do nível do mar.
- Potência (e.i.r.p.) = 56 dBm
- Unidade Remota (UR):
 - Antena: Yagi com Ganho = 6 dBi.
 - Perda em cabos e conectores = 1,8 dB.
- Rota FA:
 - Localização: Entre PTx e Restaurante Frango Assado.
 - Azimute: 198°.
 - Coordenadas: 22° 43' 14,1''S / 47° 00' 46,2''O.
 - Distância: 11,3 km.
- Rota SE:
 - Localização: Entre PTx e Restaurante Sentinela.
 - Azimute: 192°.
 - Coordenadas: 22° 38' 8''S / 47° 00' 10,3''O.
 - Distância: 20,7km.
- Rota VA:
 - Localização: Entre PTx e Restaurante Varanda.
 - Azimute: 190°.
 - Coordenadas: 22° 28' 49,3''S / 46° 58' 55,6''O.
 - Distância: 38,0 km.
- Rota RE:
 - Localização: Entre PTx e Pátio Renovias.
 - Azimute: 190°.
 - Coordenadas: 22° 31' 35,2''S / 46° 59' 36,1''O.
 - Distância: 33,0 km.
- Rota HO:
 - Localização: Entre PTx e Distrito de Holambra.
 - Azimute: 179°.

- Coordenadas: 22° 38' 47,5''S / 47° 02' 59''O.
- Distância: 19,0 km.

As Figuras 74 e 75 apresentam a predição de cobertura, a partir do Ponto de Transmissão, com a antena Omnidirecional (Ensaio Móvel) e com a antena Yagi (Ensaio Fixo).

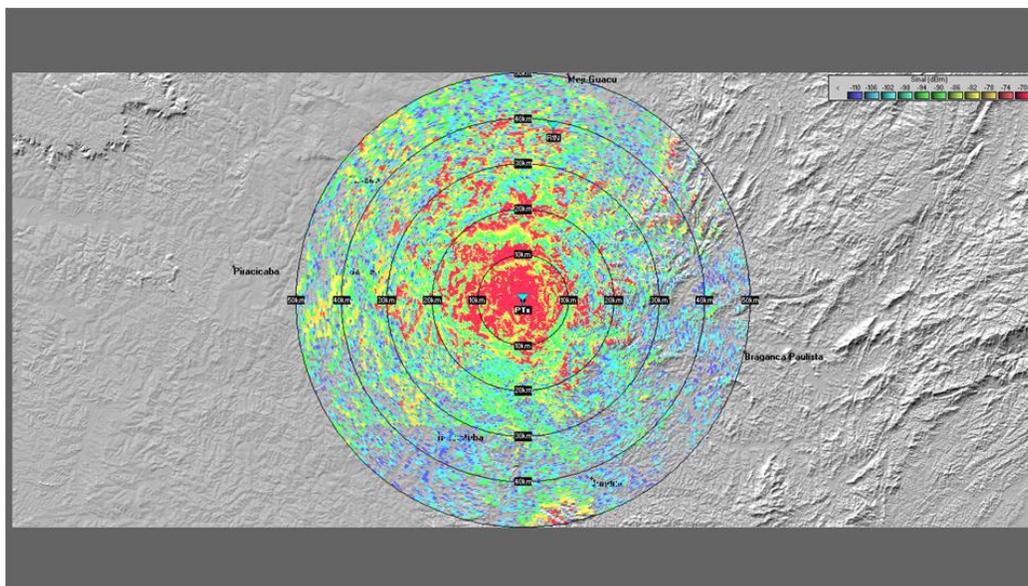


Figura 74 – Predição de cobertura a partir do PTx – Ensaio Móvel (antena Omnidirecional)

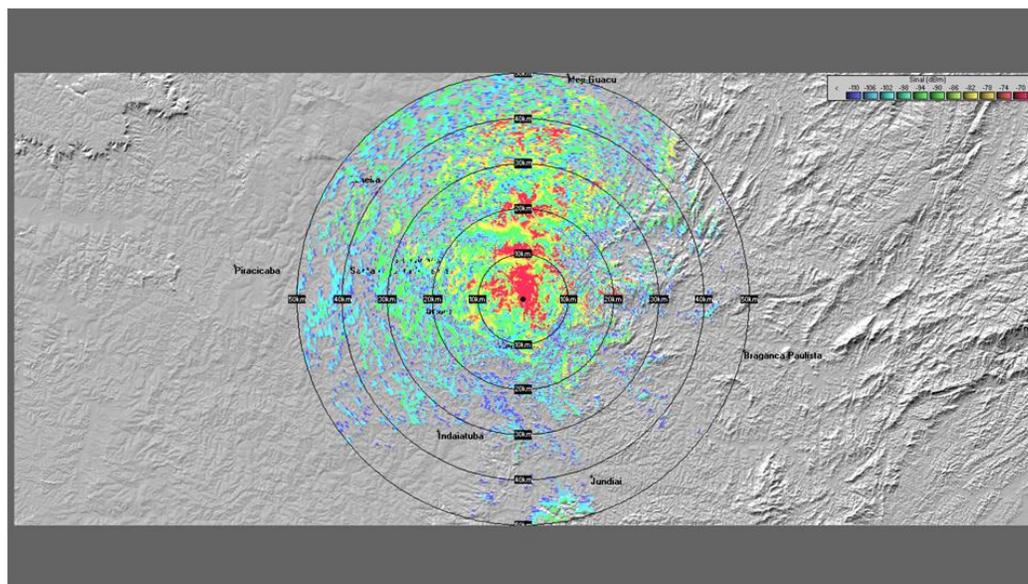


Figura 75 - Predição de cobertura a partir do PTx – Ensaio Fixo (antena Yagi)

5.1 - ENSAIO MÓVEL – R1N:

O perfil da Rota R1N é apresentado na Figura 76. Essa rota apresenta características favoráveis, tanto do ponto de vista do perfil de relevo suave, como pelo alinhamento da rodovia, onde os dados foram coletados, com a rota ponto-a-ponto.

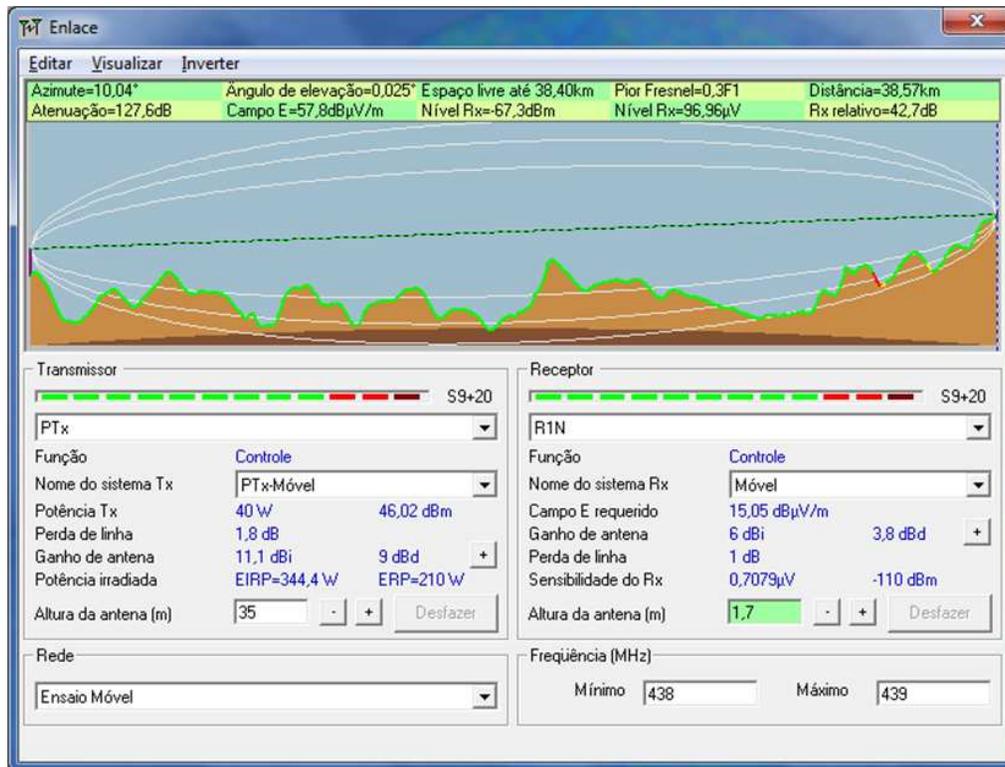


Figura 76 – Predição com parâmetros default para a rota R1N.

O alinhamento entre o trajeto, no qual foram coletados os dados, e a rota ponto-a-ponto pode ser verificado na Figura 77, onde o perfil do relevo utilizado pelo *Radio Mobile* (Altitude RM) apresenta pouca diferença com o perfil de relevo levantado em campo com o auxílio do GPS (Altitude).

Partindo-se dessa constatação, é de se esperar que a predição apresente valores para a rota muito próximos daqueles medidos. Na verdade foi encontrado um desvio entre a perda de percurso simulada e medida que diminui com a distância. A Figura 78 apresenta os valores de perda de percurso medido (Atenuação) e simulado (Atenuação RM). Já a Figura 79 apresenta o erro de predição em função da distância, depois da aplicação de média móvel de 20 amostras.

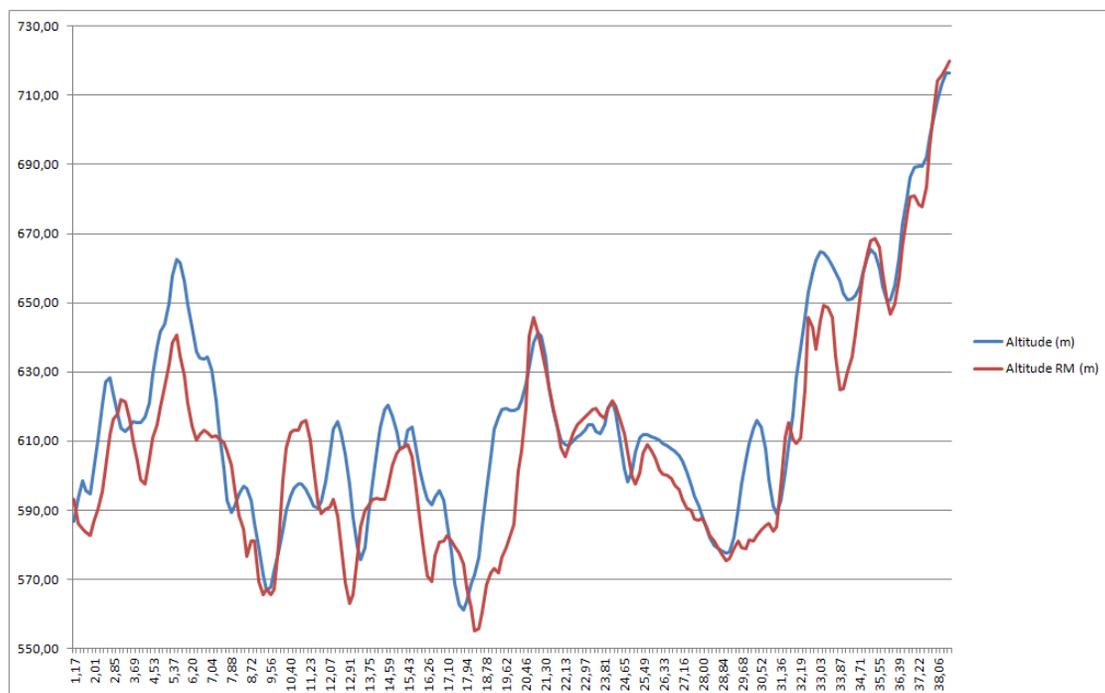


Figura 77 – Comparação entre o perfil do relevo utilizado pelo Radio Mobile e medido em campo com GPS, para a rota R1N [Altitude (m) X Distância (km)]

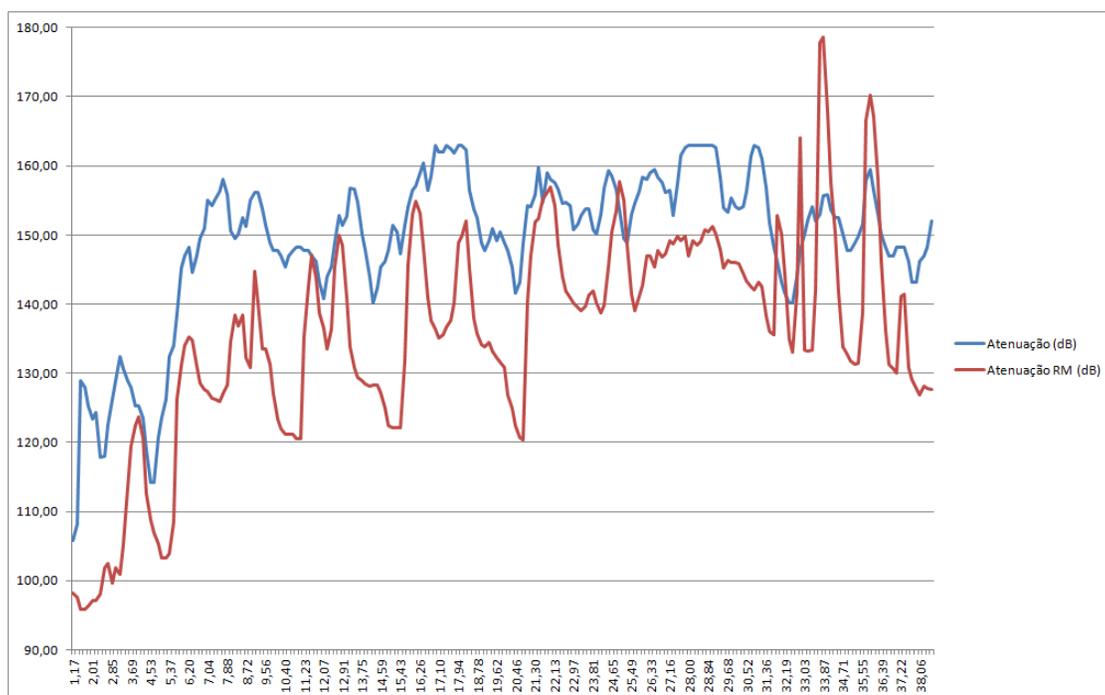


Figura 78 – Perda de Percorso simulada e medida para a Rota 1N [Atenuação (dB) X Distância (km)]

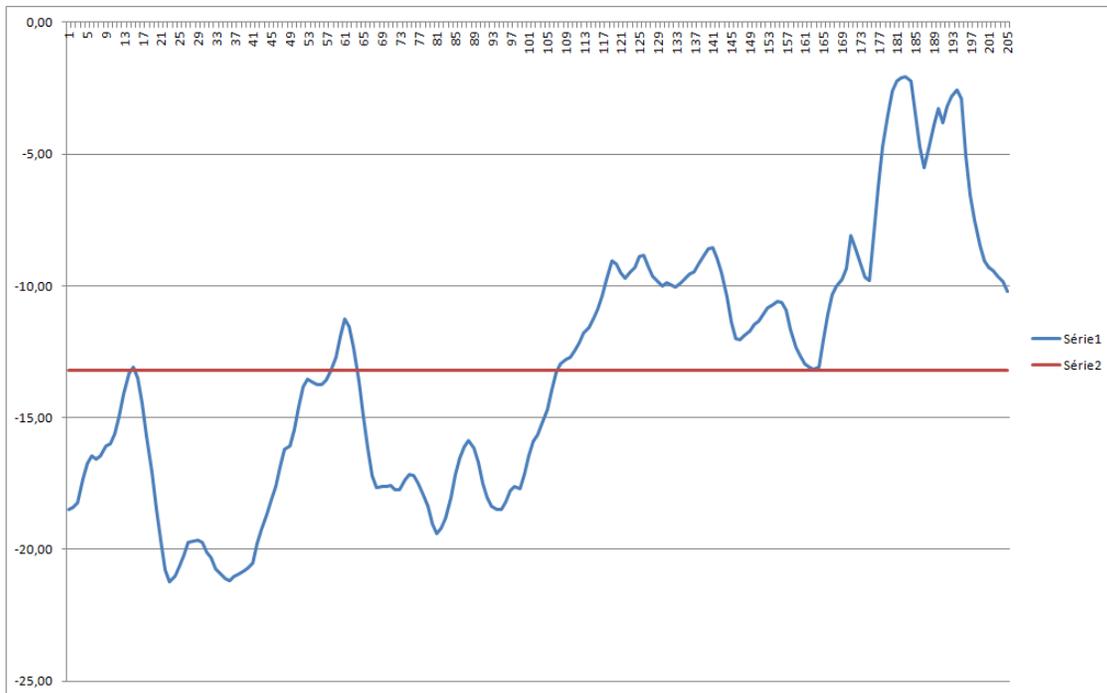


Figura 79 – [Erro (dB) X Distancia (km)] entre a perda de percurso simulada e medida.

Como mostrado na Figura 76, essa rota apresenta 30% da 1ª. Zona de Fresnel obstruída e, portanto, a perda de percurso é sensível à morfologia existente sobre o terreno, que não foi considerada nos parâmetros *default* dessa primeira simulação. Uma segunda simulação foi então realizada alterando-se os parâmetros para 45% da rota coberta por florestas e a variabilidade de situação foi ampliada de 70% para 80%. A Figura 80 mostra o resultado dessa segunda simulação.

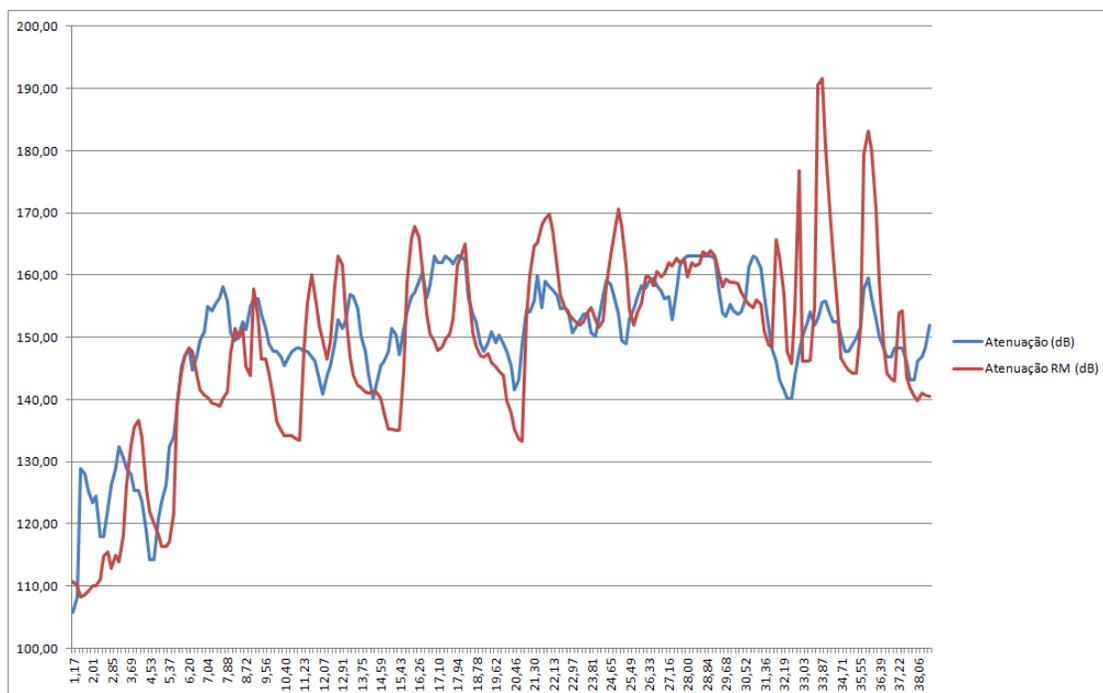


Figura 80 - Perda de Percurso simulada e medida para a Rota 1N [Atenuação (dB) X Distância (km)], para 45% do percurso coberto por floresta e variabilidade de situação de 85%.

A Figura 81 apresenta o desvio entre os valores simulados e medidos, demonstrando que, com os parâmetros agora escolhidos, é possível obter-se uma predição de perda de percurso, para este perfil de rota, com desvio menor que +/- 10 dB.

O $ERROR_{RMS}$ com parâmetros default, para toda a rota, é de 16,8 dB. Depois do ajuste de parâmetros o $ERROR_{RMS}$ caiu para 9,8 dB.

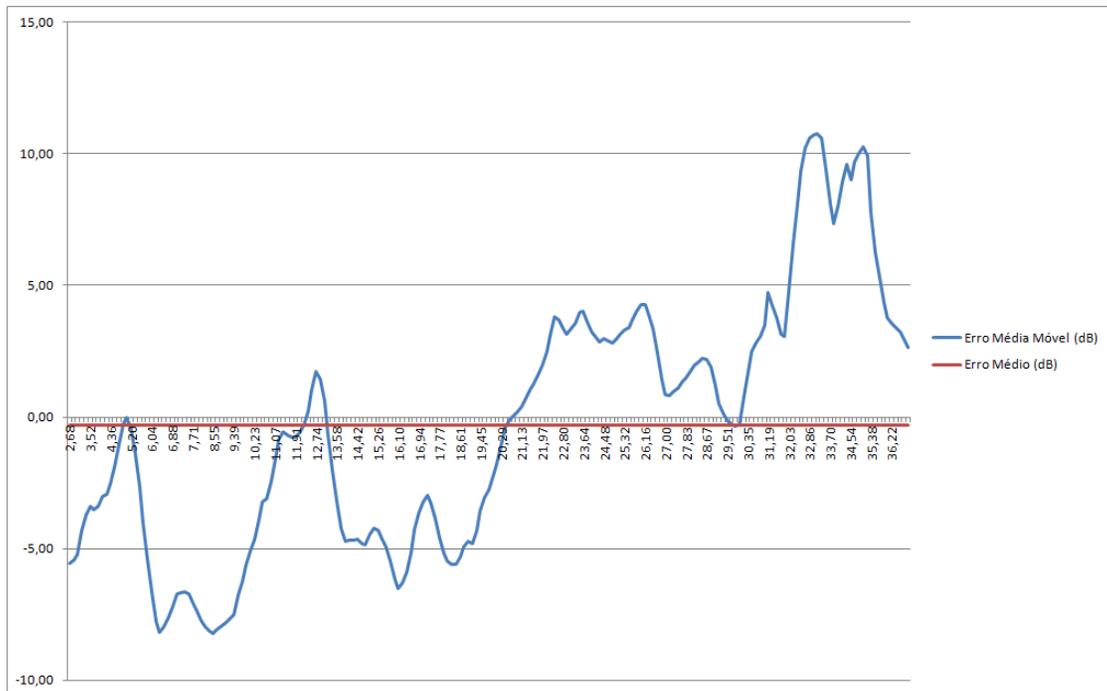


Figura 81 - [Erro (dB) X Distancia (km)] entre a perda de percurso simulada e medida, para 85% das situações e 45% do percurso coberto por floresta.

Ensaio Móvel – R2SO:

O perfil da Rota R2SO é apresentado na Figura 82. Essa rota apresenta características desfavoráveis quanto ao alinhamento da rodovia, onde os dados foram coletados, com a rota ponto-a-ponto utilizada pelo modelo de simulação.

O desalinhamento entre o trajeto e a rota ponto-a-ponto pode ser verificado na Figura 83, onde o perfil do relevo utilizado pelo *Radio Mobile* (Altitude RM) apresenta grande diferença com o perfil de relevo levantado em campo com o auxílio do GPS (Altitude).

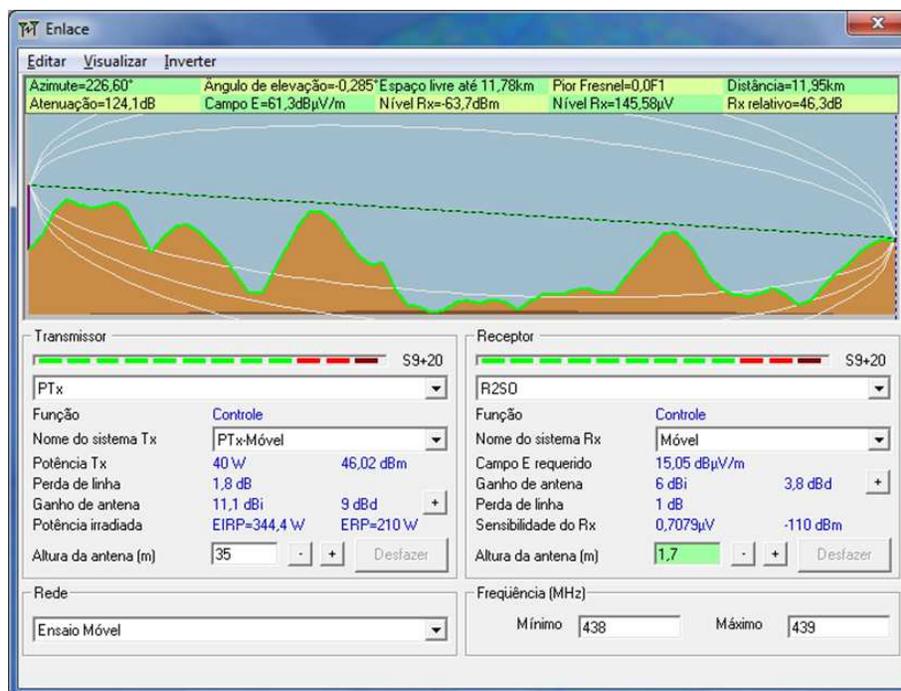


Figura 82 - Predição com parâmetros default para a rota R2SO.

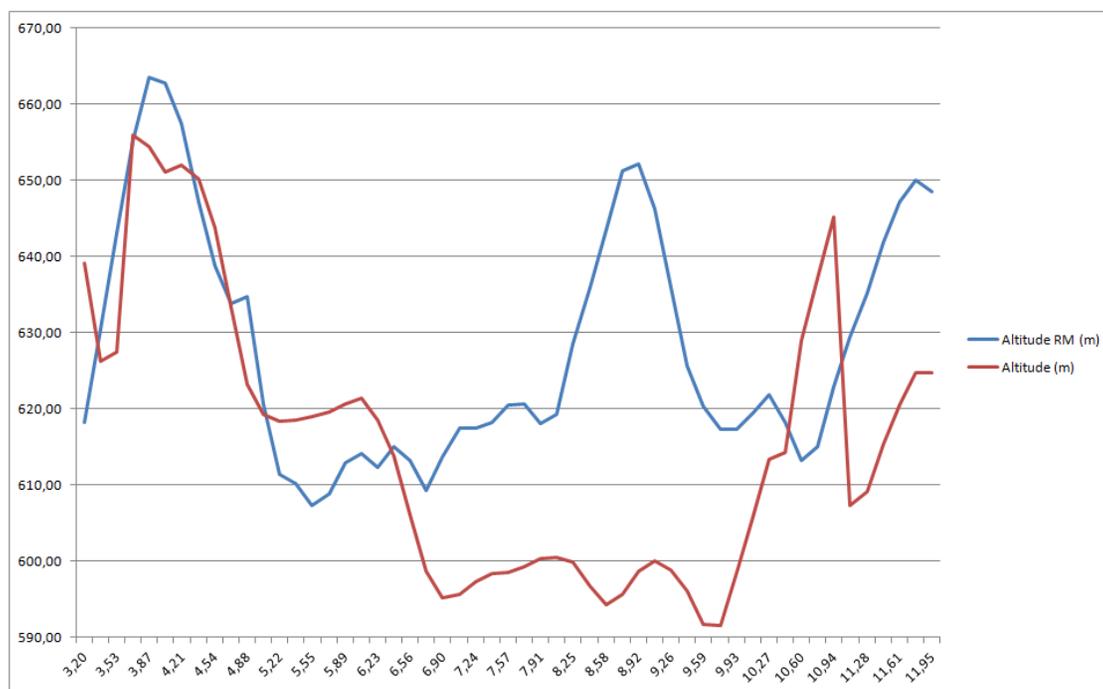


Figura 83 - Comparação entre o perfil do relevo utilizado pelo Radio Mobile e medido em campo com GPS, para a Rota R2SO [Altitude (m) X Distância (km)]

Partindo-se dessa constatação, é de se esperar que a predição não apresente valores para a rota muito próximos dos medidos. A Figura 84 apresenta os valores de perda de percurso medido (Atenuação) e simulado (Atenuação RM).

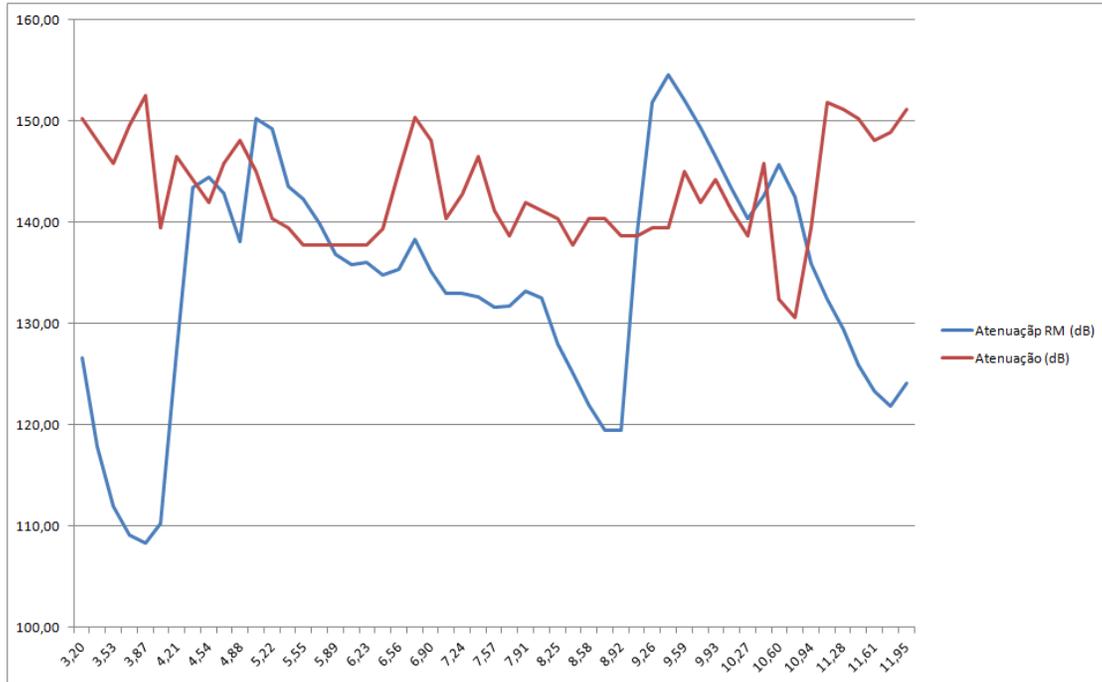


Figura 84 - Perda de Percurso simulada e medida para a Rota 2SO [Atenuação (dB) X Distância (km)]

De fato, os valores de predição e medidos aproximam-se para distâncias entre 4,5 km e 6,5 km, região na qual os perfis de relevo medido e simulado se aproximam e os desvios são inferiores a +/- 10 dB. O $ERRO_{RMS}$ ao longo de toda rota é de 192 dB, enquanto que o $ERRO_{RMS}$ no trecho de dois quilômetros, acima referido, é de 18,4 dB.

Ensaio Móvel – R4SE:

O perfil da Rota R4SE é apresentado na Figura 85. Essa rota também apresenta características desfavoráveis quanto ao alinhamento da rodovia, onde os dados foram coletados, com a rota ponto-a-ponto, além de forte obstrução.

O desalinhamento entre o trajeto no qual foram coletados os dados e a rota ponto-a-ponto pode ser verificado na Figura 86, onde o perfil do relevo utilizado pelo *Radio Mobile* (Altitude RM) apresenta grande diferença com o perfil de relevo levantado em campo com o auxílio do GPS (Altitude).

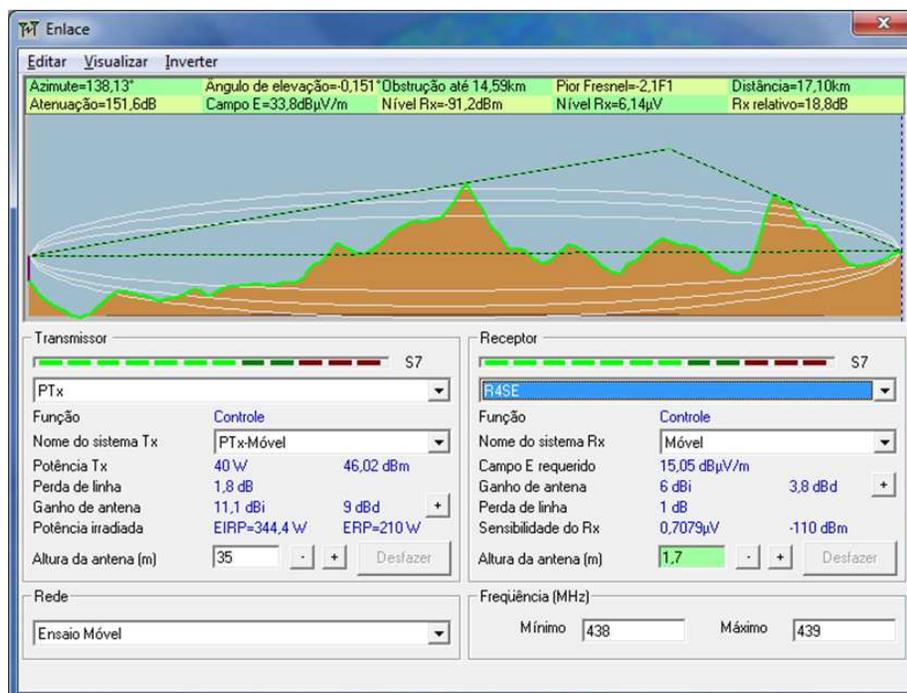


Figura 85 - Predição com parâmetros default para a rota R4SE.

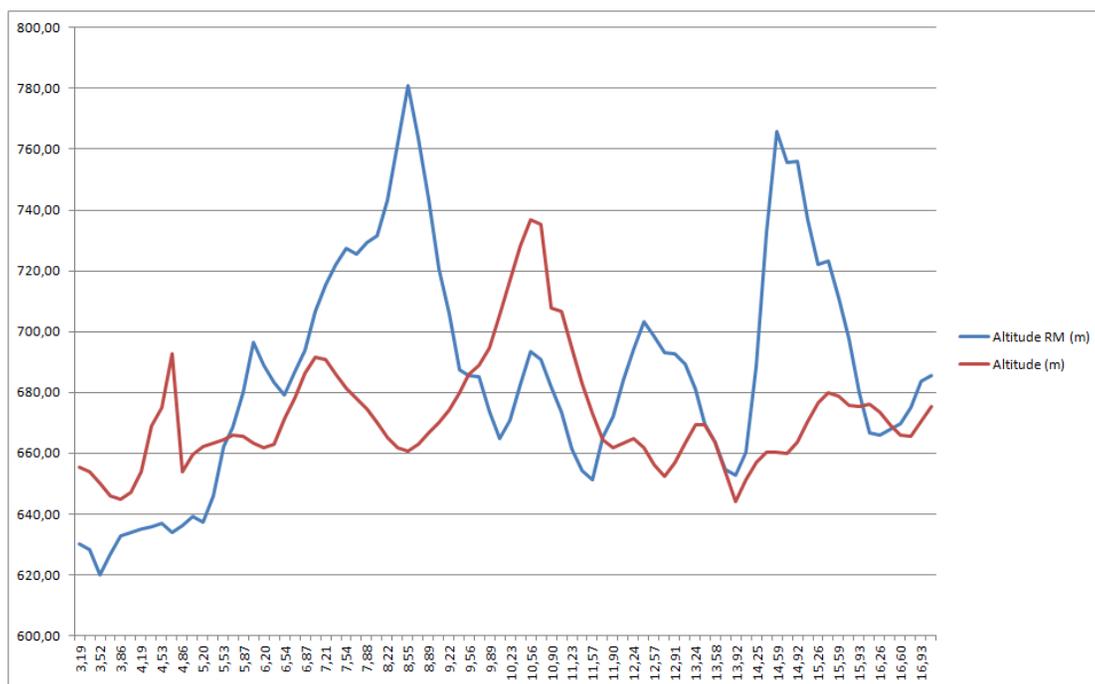


Figura 86 - Comparação entre o perfil do relevo utilizado pelo Radio Mobile e medido em campo com GPS, para a Rota R4SE [Altitude (m) X Distância (km)].

Partindo-se dessa constatação, é de se esperar que a predição não apresente valores para a rota muito próximos dos medidos. A Figura 87 apresenta os valores de perda de percurso medido (Atenuação) e simulado (Atenuação RM).

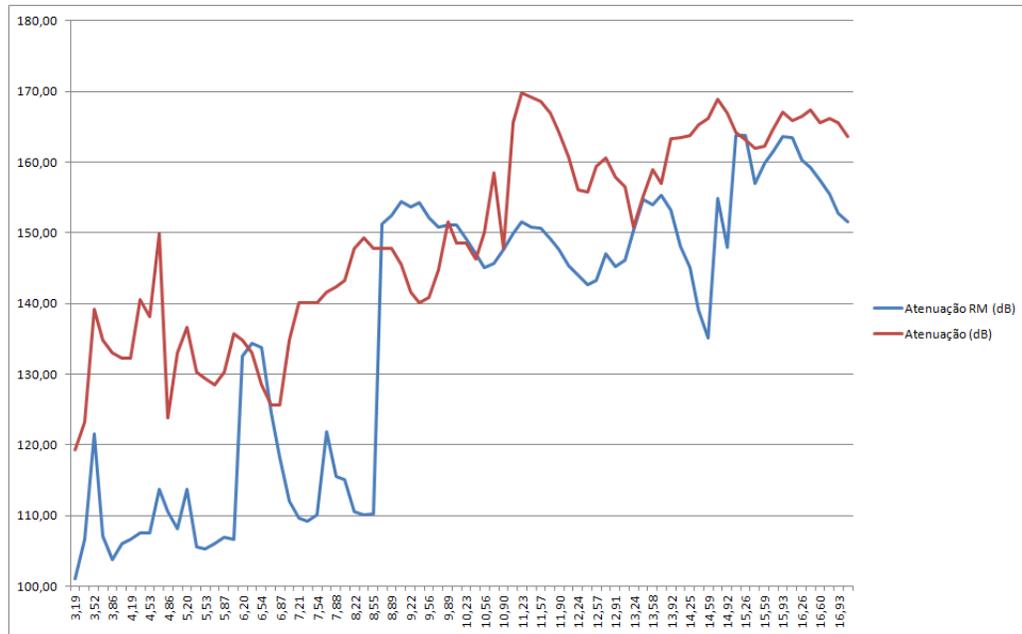


Figura 87 - Perda de Percurso simulada e medida para a Rota 4SE [Atenuação (dB) X Distância (km)]

De fato, os valores de predição e medidos aproximam-se para distâncias entre 9,5 km e 14 km, região na qual os perfis de relevo medido e simulado se aproximam e os desvios são inferiores a +20 dB e - 10 dB. O $Erro_{RMS}$ ao longo de toda rota é de 18,5 dB, enquanto que o $Erro_{RMS}$ no trecho de 4,5 quilômetros, acima referido, é de 11,6 dB.

5.2 - ENSAIO FIXO:

As Figuras 88 a 92 apresentam o resultado da predição da perda por percurso para os cinco pontos fixos remotos avaliados no Ensaio Fixo, para a antena da Unidade Remota posicionada a 10 metros de altura, e com o enlace operando na polarização vertical. A Tabela 18 apresenta a característica de obstrução da 1ª. Zona de Fresnel para cada enlace. É possível observar enlaces operando aproximadamente em linha de visada (LoS), com obstrução de apenas 10% da 1ª. ZF, até enlaces com 140% de obstrução, operando completamente em difração.

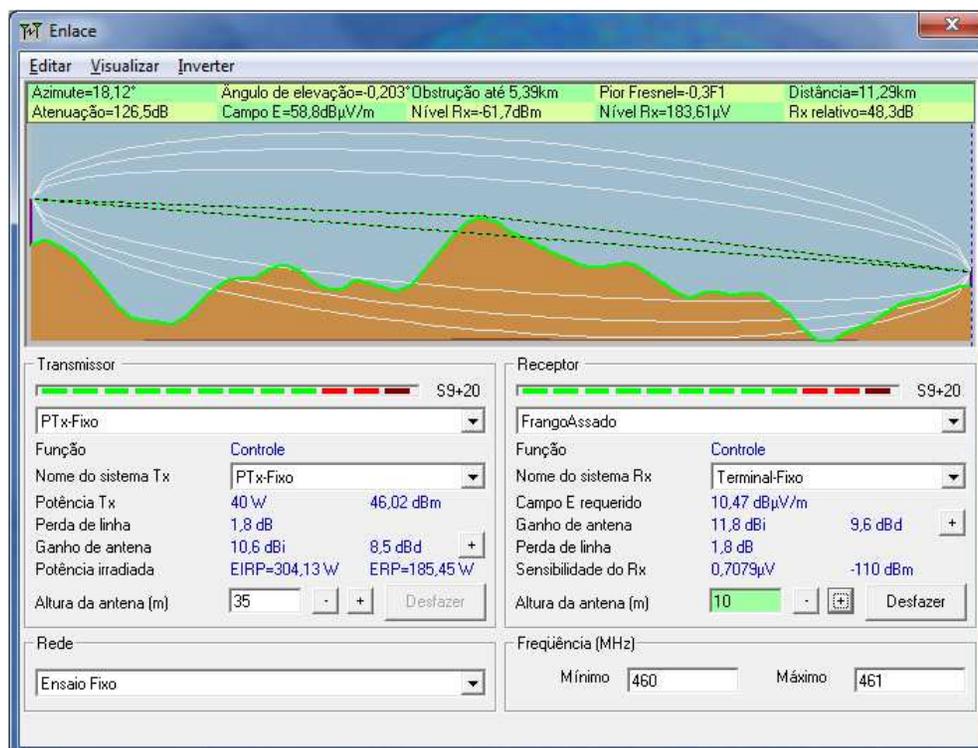


Figura 88 – Predição da rota PTx-FA para $h_a=10m$ e parâmetros default.

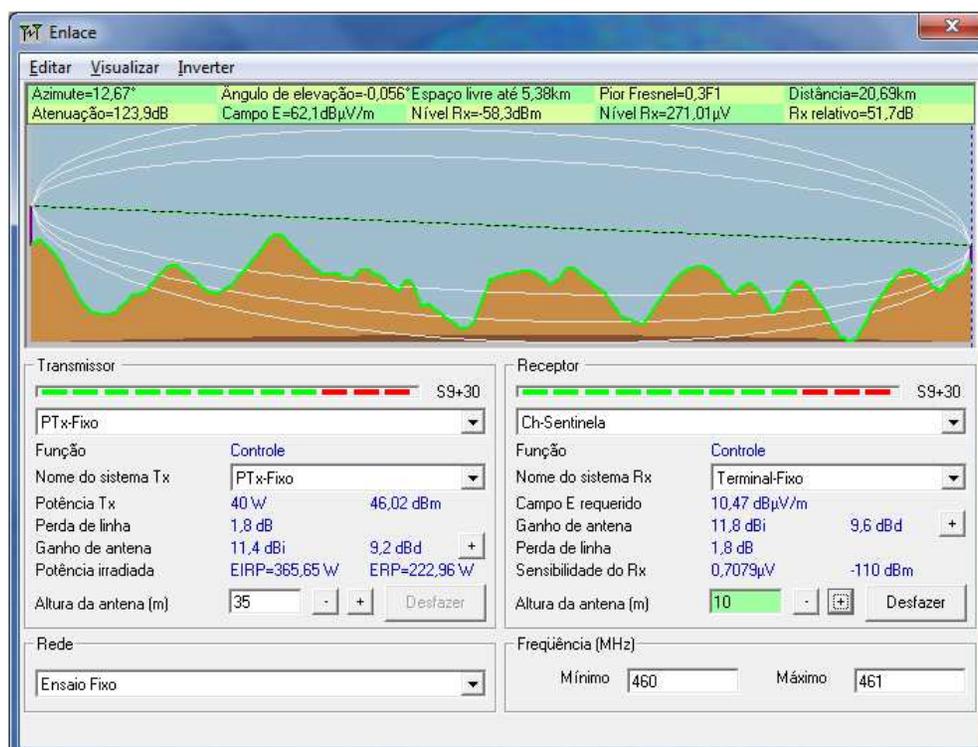


Figura 89 - Predição da rota PTx-SE para $h_a=10m$ e parâmetros default.

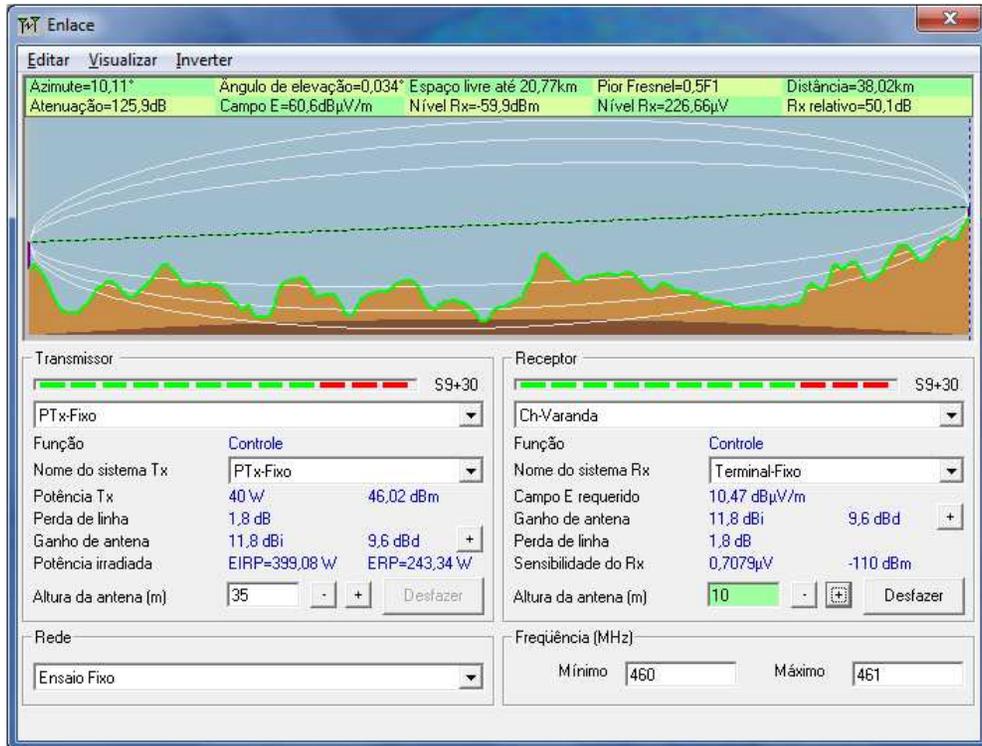


Figura 90 - Predição da rota PTx-VA para $h_a=10\text{m}$ e parâmetros default.

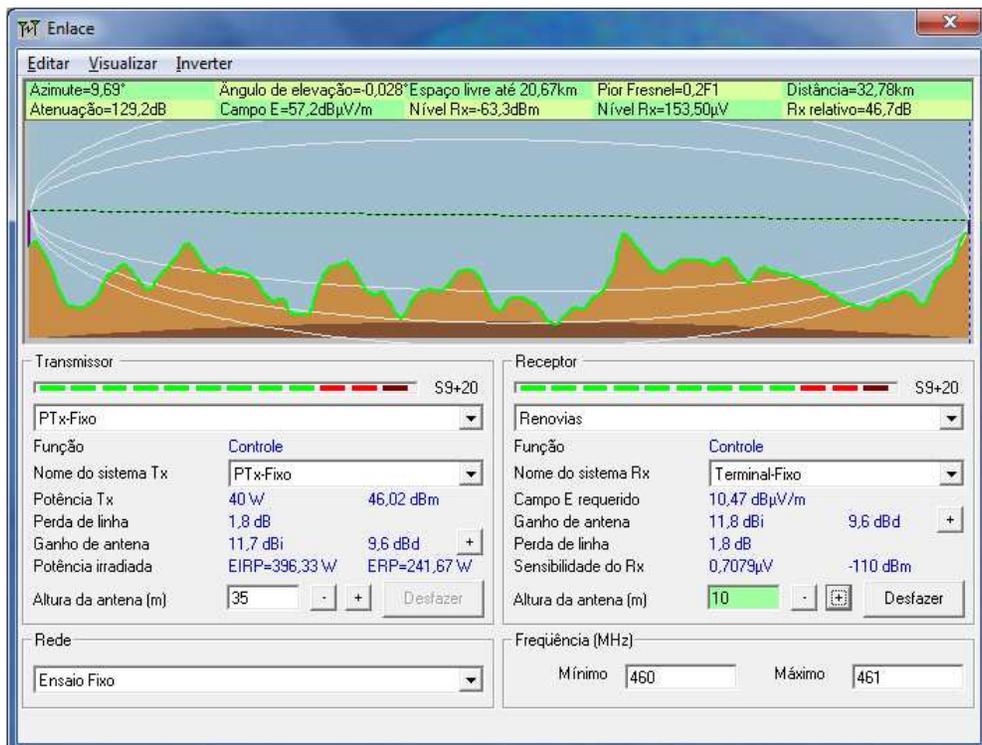


Figura 91 - Predição da rota PTx-RE para $h_a=10\text{m}$ e parâmetros default.

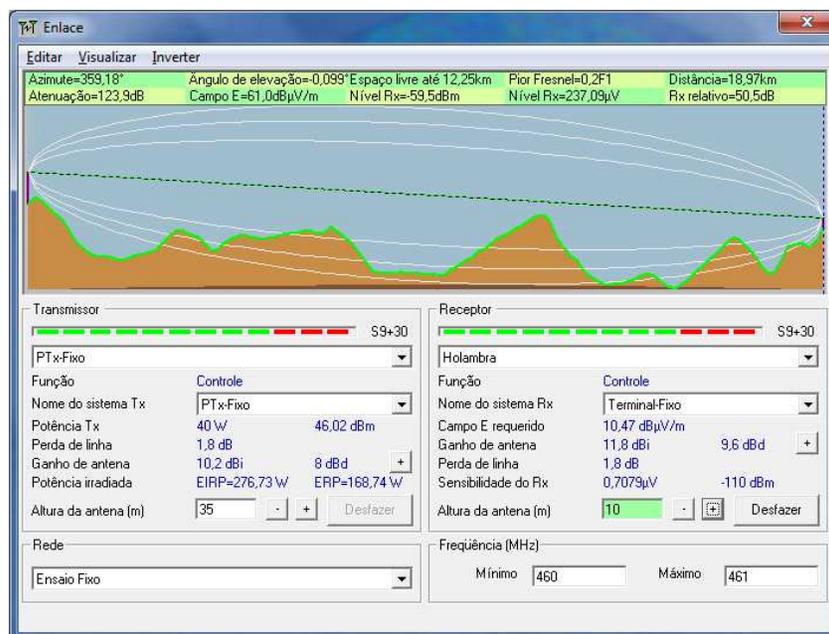


Figura 92 - Predição da rota PTx-HO para $h_a=10\text{m}$ e parâmetros default.

Tabela 18 – Característica de obstrução da 1ª. Zona de Fresnel para os cinco enlaces avaliados.

Enlace	Obstrução da 1ª. ZF p/ $h_a = 2\text{m}$	Obstrução da 1ª. ZF p/ $h_a = 10\text{m}$
FA	-40%	-30%
SE	20%	30%
VA	40%	50%
RE	20%	20%
HO	10%	20%

A Tabela 19 apresenta a síntese dos resultados obtidos em campo comparados com a predição realizada pelo *Radio Mobile*, para alturas da antena da Unidade Remota variando entre 2 m e 10 m.

Tabela 19 – Resultados de campo e predição, para a perda de percurso (dB), em função da altura da antena da Unidade Remota, para as cinco rotas avaliadas.

ha	FA		SE		VA		RE		HO	
	RM	CAMPO								
2m	127,8	129,4	124,7	139,3	126,9	148,8	130,6	139,1	125,7	120,2
4m	127,5	124,7	124,5	136,4	126,6	145,1	130,3	135,2	125,3	119,8
6m	127,2	122,8	124,3	131,2	126,4	146,7	129,9	130,2	124,8	117,8
8m	126,9	124,2	124,1	128,8	126,1	137,7	129,6	125,6	124,4	118,6
10m	126,5	123,6	123,9	126,7	125,9	135,9	129,2	123,1	123,9	115,5

A Tabela 20 apresenta os desvios entre os valores simulados na predição e os valores efetivamente medidos em campo. Nota-se que o erro absoluto é menor que +/- 10 dB na maioria das avaliações, podendo chegar a até 20 dB em alguns poucos casos. Outra observação interessante é que o $Erro_{RMS}$ cai de praticamente 12 dB para 6 dB quando a altura da antena da Unidade Remota é elevada de 2 m para 10 m. Essa variação pode ser imputada à dificuldade do modelo *Longley-Rice* em caracterizar adequadamente a morfologia sobre o relevo, principalmente em enlace com obstrução da 1ª. ZF, ou seja, enlaces em difração que sofrem forte influência da morfologia.

Tabela 20 - Desvios entre os valores simulados na predição e os valores efetivamente medidos em campo (dB), em função da altura da antena da Unidade remota, para as cinco rotas avaliadas.

ha	FA	SE	VA	RE	HO	$Erro_{RMS}$
2m	-1,6	-14,6	-21,9	-8,5	5,5	12,65
4m	2,8	-11,9	-18,5	-4,9	5,5	10,46
6m	4,4	-6,9	-20,3	-0,3	7,0	10,28
8m	2,7	-4,7	-11,6	4,0	5,8	6,54
10m	2,9	-2,8	-10,0	6,1	8,4	6,69
$Erro_{RMS} =$	3,03	10,32	18,52	5,31	5,96	

5.3 - CONCLUSÕES SOBRE A COMPARAÇÃO DE RESULTADOS SIMULADOS E MEDIDOS EM CAMPO.

No Capítulo 3 foram feitas algumas aproximações dos valores medidos para a perda de percurso nas oito rotas/radiais avaliadas no Ensaio Móvel. Essas aproximações consideraram a aproximação NLOS (*Non-Line-of-Sight*), como definida pela equação 3.4. Foi possível verificar, como era de se esperar, que essa aproximação é válida para alguns enlaces com pouca obstrução, nos quais a perda de percurso aumenta logaritmicamente com a distância. Entretanto, enlaces na faixa de UHF com mais de 10 km de comprimento podem apresentar propagação com forte difração, demandando modelagem mais detalhada, ou mesmo analítica, da rota.

Modelos de propagação como os aqui mencionados, *Longley-Rice* e ITU-R P.1812-2, analisam o enlace dessa forma analítica, segmentando-o em dois trechos terminais com

propagação em linha de visada, até o primeiro obstáculo, e calculando a propagação em difração entre esses obstáculos, conhecidos como horizontes óticos.

Neste capítulo foram apresentadas as comparações entre os valores de perda de percurso medidos em campo em relação àqueles resultantes da aplicação do modelo *Longley-Rice*, implementado pelo software *Radio Mobile*. Desvios de predição inferiores a ± 10 dB foram verificados quando as características da base de dados de simulação são aderentes às condições topográficas e morfológicas de campo.

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são resumidas as principais conclusões e considerações a respeito das questões sistêmicas levantadas no início dos trabalhos, incluindo os resultados de simulação da perda de percurso.

6.1 - DESVANECIMENTO SELETIVO

A amplitude do desvanecimento seletivo, à qual o equalizador de canal será submetido, tende a ser menor que ± 3 dB, tipicamente ± 1 dB. O ambiente multipercurso em região rural é tipicamente de baixa densidade, podendo inviabilizar a aplicação da técnica MIMO de multiplexação espacial.

6.2 - DESVANECIMENTO POR DESPOLARIZAÇÃO

Os desvios de polarização em ambiente rural não devem ultrapassar o limite de 10° , o que corresponde a um desvanecimento por despolarização desprezível, menor que 0,07 dB, dispensando a aplicação de técnicas de diversidade de polarização.

6.3 - RUÍDO IMPULSIVO

A potência de pico do ruído impulsivo na área rural tende a ser 20 dB menor que em áreas urbanas. O patamar de ruído impulsivo, com amplitudes entre -140 e -145 dBm/Hz aparece nos três ambientes, rural, urbano e urbano denso, entre 5% e 12 % das amostras. Amplitudes de ruído impulsivo entre -115 e -120 dBm/Hz estão presentes nos três ambientes, em 0,2% das amostras na área rural, em 7% das amostras na área urbana e em 30% das amostras na área urbana densa. Cuidado especial deverá ser tomado quando da implantação desses sistemas próximo a aglomerado urbanos, considerando-se que a

potência de ruído impulsivo poderá atingir níveis de até -50 dBm para canais de 5 MHz de largura.

6.4 - PERDA DE PERCURSO (MODELO DE PROPAGAÇÃO)

- Para relevos equivalentes aos das oito radiais avaliadas, raios de cobertura contínua entre 12km e 20km podem ser esperados.
- A perda de percurso de seis das oito radiais pôde ser representada pelo modelo NLOS proposto. Para essas seis radiais o valor de γ variou entre 2,6 e 6,0. O valor da perda de percurso, para a distância de 1km (L_0), variou entre 81,1dB e 141,6 dB. Esses valores estão dentro da faixa esperada para regiões rurais e suburbanas.
- As duas radiais, para as quais não foi possível aplicar o modelo NLOS, apresentam as seguintes características:
 - R4S - O valor de $H_a - n_{mt}$ está próximo de zero e o horizonte ótico está próximo (1500m). Nesse caso o modelo de propagação por difração é preponderante em relação aos modelos de perda no espaço livre ou de dois raios.
 - R2SO - Apesar de o valor da $H_a - n_{mt}$ ser elevado (91m), o horizonte ótico está extremamente próximo (573m), seguido de um relevo baixo e plano. Da mesma forma, o modelo de propagação por difração é preponderante em relação aos modelos de perda no espaço livre ou de dois raios.
- O valor de γ , para o modelo aproximado NLOS, manteve-se dentro dos valores esperados para a propagação em ambiente rural ($2,0 < \gamma < 4$), para as radiais com valor de $H_a - n_{mt}$ elevado e horizonte ótico distante. A radial R1NO não atendeu a essa tendência.
- A análise da radial R1NO apresenta os seguintes detalhes: A Figura 38 apresenta um relevo extremamente favorável, sem obstruções próximas. Já as Figuras 39 e 40 mostram claramente a existência de dois ambientes de propagação distintos, um até 12km e outro a partir de 12km, até 45km. Este é um exemplo concreto de

propagação através de ambientes distintos, que impossibilita o modelamento através de uma única aproximação.

- Para duas rotas analisadas (R3E e R3SE) o valor de γ na aproximação NLOS situou-se próximo ao valor máximo (6,0). Essa característica pode ser associada ao fato de a antena de transmissão estar bem abaixo do nível médio da radial (-32m e -61m).
- Para cinco das oito radiais analisadas, a aproximação pelo modelo NLOS pode ser realizada com erro de predição menor que +/-17dB. Para as demais radiais a aproximação por um único modelo ao longo do enlace não é aplicável. Nesses casos, o enlace total deverá ser subdividido em trechos e modelado por partes, ou um modelamento analítico deverá ser aplicado.

6.5 - PERDA DE PERCURSO X ALTURA DA ANTENA

A variação da perda de percurso, em função da altura da antena do terminal, é maior para antenas na polarização horizontal que para antenas na polarização vertical. Pode-se especular que o campo elétrico horizontal é mais suscetível à proximidade com o solo que o campo elétrico vertical, ortogonal ao solo. A variação da perda de percurso é maior para alturas de antena de terminal entre 2 e 4 metros, possivelmente devido à sua interação com a morfologia próxima, como vegetação, edificações e o próprio solo. Variações entre 1,0 dB/m e 1,5 dB/m (2 a 3 dB @ 2m) foram verificadas para a altura da antena do terminal acima de 4m.

6.6 - DISCRIMINAÇÃO DE POLARIZAÇÃO DA ANTENA DO TERMINAL

Como era de se esperar, a discriminação de polarização cai com a distância, devido às reflexões e difrações acumuladas ao longo do percurso. Foram obtidos valores de discriminação de polarização entre 10 dB e 35 dB, contudo, um valor característico de 20 +/-5 dB parece ser aceitável.

6.7 - ADEQUAÇÃO DO MODELO LONGLEY-RICE.

O modelo *Longley-Rice* foi exercitado, em comparação com os dados colhidos em campo, em três das oito rotas do Ensaio Móvel e em cinco rotas do Ensaio Fixo. Quando devidamente parametrizado e com as características topográficas aderentes, o modelo mostrou-se sistematicamente adequado para predições com até +/- 10 dB de desvio.

6.8 - ADEQUAÇÃO DO MODELO ITU-R P.1812-2.

O modelo ITU-R P.1812-2 demonstra ser mais atualizado e detalhado que o modelo *Longley-Rice*, permitindo expectativas de predições com desvios inferiores aos experimentados neste trabalho. Entretanto, a dificuldade de obtenção desse modelo como aplicativo computacional impediu o exercício similar ao que foi realizado com o aplicativo *Radio Mobile*.

6.9 - TRABALHOS FUTUROS.

Os resultados colhidos no decorrer deste trabalho apontam para várias oportunidades de melhoria e aprofundamento. São elas:

- Caracterização sistemática do ruído impulsivo (MMN – *Man Made Noise*), sua influência sobre a qualidade de serviço (QoS) de sistemas banda larga operando nas faixas de UHF e contramedidas no nível do *front-end* de RF, FI e processamento de Banda-Base.
- Aprimoramento da parametrização dos modelos *Longley-Rice* e ITU-R P.1812-2, para aplicação nas regiões radio-climáticas brasileiras.
- Avaliação dos desvios de predição do modelo ITU-R P.1812-2.

REFERÊNCIAS

- [1] Resolução Anatel n ° 558/2010, Regulamento sobre Canalização e Condições de Uso de Radiofrequências na Faixa de 450 MHz a 470 MHz, 20/12/2010.
- [2] Portaria MC N°431 - Institui o Programa Nacional de Telecomunicações Rurais, em 23 de julho de 2009, disponível no sítio da Anatel na Internet no endereço:
http://www.anatel.gov.br/hotsites/Direito_Telecomunicacoes/TextoIntegral/NOR/prt/minicom_20090723_431.pdf
- [3] Decreto N° 7.175 - Institui o Programa Nacional de Banda Larga – PNBL, em 12 de maio de 2010, disponível no sítio do Governo Federal na Internet no endereço:
http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Decreto/D7175.htm
- [4] Anders Frederich - Chairman WRC-07 CPG presentation – page 9
http://rspg.ec.europa.eu/_documents/documents/meeting/rspg14/rspg14_result_wrc.pdf.
- [5] Longley A. G. and Rice P. L., Prediction of Tropospheric Radio Transmission Loss Over Irregular Terrain - A Computer Method, Tropospheric Telecommunications Laboratory – NTIS - ITS - BOULDER, COLORADO 80302, July 1968.
- [6] Rice P. L., A. G. Longley A. G., Norton K. A. and Barsis A. P., Technical Note 101 (REVISED) - Transmission Loss Predictions for Tropospheric Communication Circuits - Volume II, National Bureau of Standards - U. S. Department of Commerce - Springfield (VA) - USA, January 1967.
- [7] Radio Mobile prediction SW website: <http://www.cplus.org/rmw/english1.html>.
- [8] ITU-R P.1546-1, Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3 000 MHz, 2001-2003.
- [9] ITU-R P.1812-2, A path-specific propagation prediction method for point-to-area terrestrial services in the VHF and UHF bands, 02/2012.
- [10] BARRIS A. P. & MILES J. Distribuição Acumulativa da Intensidade de Campo em Terrenos Irregulares com Antenas Baixas - Relatório 889. Colorado: NBS, 1965.
- [11] HUFFORD A. G. A Guide to the Use of the ITS Irregular Terrain Model in the Area Prediction Mode. Washington: NTIA, 1982.
- [12] LOFSVED E.M., BROMS M. and JOHANSSON B.G., Man-Made Noise Measurements Considering Digital Communication Services, Swedish Defence Research Agency, Linköping, Sweden, 2000.