



Eduardo Paes Barreto

**Caracterização da Perda de Propagação em
Região Urbana nas faixas de 2,5 GHz e 3,5 GHz**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica da PUC-Rio como requisito parcial
para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Luiz Alencar Reis da Silva Mello

Co-orientador: Prof. Carlos Vinicio Rodriguez Ron

Rio de Janeiro
Setembro de 2013



Eduardo Paes Barreto

**Caracterização da Perda de Propagação
em Região Urbana nas faixas de 2.5
GHz e 3.5GHz**

Dissertação de Mestrado apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Luiz Alencar Reis da Silva Mello
Orientador

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

Prof. Carlos Vinício Rodríguez
Co-Orientador

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

Prof. Glaucio Lima Siqueira

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

Prof. Rodolfo Saboia Lima de Souza
INMETRO

Prof. José Eugenio Leal
Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 23 de setembro de 2013

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Eduardo Paes Barreto

Graduou-se em Engenharia Elétrica com ênfase em Telecomunicações pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ. Atualmente, atua como Oficial Engenheiro na Marinha do Brasil

Ficha Catalográfica

Barreto, Eduardo Paes

Caracterização da perda de propagação em região urbana nas faixas de 2,5 GHz e 3,5 GHz / Eduardo Paes Barreto; orientador: Luiz Alencar Reis da Silva Mello; co-orientador: Carlos Vinicio Rodriguez Ron. – 2013.

78 f. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2013.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Rádio propagação. 3. Caracterização do canal banda estreita. 4. Frequência de 2,5 GHz e 3,5 GHz. I. Mello, Luiz Alencar Reis da Silva. II. Rodriguez Ron, Carlos Vinicio. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD: 621.3

Dedico o sucesso desta etapa da minha vida a quem sempre me incentivou a enfrentar desafios, ensinou e esteve presente, nos momentos certos e incertos: a minha esposa, aos meus pais e família pelo amor e compreensão.

Agradecimentos

À minha esposa e família, pelo incentivo e compreensão durante o período do desenvolvimento deste trabalho e permanente fonte de inspiração.

Ao meu orientador, Professor Luiz Alencar Reis da Silva Mello, pela excelente orientação, competência, paciência, confiança e por ter sido um grande amigo. Muito obrigado por tudo!

Ao meu co-orientador Carlos Ron, pela orientação segura.

Ao Professor e enorme colaborador Leonardo Gonsioroski, por toda ajuda na implementação do simulador e pelas excelentes dicas e discussões realizadas.

À CAPES pela ajuda financeira dada durante o curso, sem a qual seria impossível a realização deste trabalho.

Agradeço ao Emerson, amigo de Mestrado que muito contribuiu no árduo trabalho de medições e nas discussões que contribuíram na consolidação dos conceitos. Obrigado pela ajuda!

Aos professores do grupo de sistemas de comunicação do CETUC, pela excelente receptividade e por contribuírem bastante para o meu crescimento profissional.

Aos funcionários da PUC, em especial aos do CETUC, por todo auxílio dado ao longo do curso.

Resumo

Paes Barreto, Eduardo; Silva Mello, Luiz Alencar Reis da (Orientador); Ron, Carlos Vinicio Rodriguez (Co-orientador). **Caracterização da Perda de Propagação em Região Urbana nas faixas de 2,5 GHz e 3,5 GHz**. Rio de Janeiro, 2013. 78p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A busca constante pela melhoria dos meios de comunicação em banda larga demandou o surgimento de novas tecnologias visando atender a real necessidade de seus usuários. O uso de mobilidade no acesso à internet banda larga como propõem os padrões WiMAX e LTE, impõe a necessidade de se estudar com mais profundidade os parâmetros que caracterizam um canal rádio móvel. Este trabalho objetiva apresentar os resultados experimentais que permitem caracterizar em banda estreita o comportamento do canal de radiopropagação num ambiente urbano. Como resultado das campanhas de medições, são identificados modelos do canal que possibilita ao projetista definir os melhores critérios para a implantação de uma rede móvel de acesso sem fio. Desta forma, são apresentadas duas campanhas de medições, operando nas frequências de 2,5 GHz e 3,5 GHz, destinadas para novos serviços móveis banda larga.

Palavras-chave

Rádio propagação; caracterização do canal banda estreita; frequência de GHz e 3,5 GHz.

Abstract

Paes Barreto, Eduardo; Silva Mello, Luiz Alencar Reis da (Advisor); Ron, Carlos Vinicio Rodriguez (Co-advisor). **Propagation loss Measurements and Modeling in an Urban region at 2,5 GHz and 3,5 GHz.** Rio de Janeiro, 2013. 78p. MSc Dissertation - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The constant search for improvement of broadband communication systems requires new technologies to attend the increasing needs of the users. The use of mobility in broadband Internet access as proposed in WiMAX and LTE standards, imposes the need to further understand the parameters that characterize a channel mobile radio. This dissertation presents experimental results that allow characterizing the narrow band channel behavior of radio propagation in an urban environment. As a result of measurement campaigns, channel models are identified which allow the designer to define the best criteria to implement a mobile wireless network. The work presents results of two measurement campaigns, at the frequencies of 2.5 GHz and 3.5 GHz, designed for new mobile broadband services.

Keywords

Radio propagation; characterization of the channel bandwidth; frequency of 2,5GHz and 3,5GHz.

Sumário

1 Introdução	13
1.1. Justificativas e motivações do trabalho	14
1.2. Estrutura da dissertação	15
2 Radio Propagação Móvel	16
2.1. Propagação de ondas eletromagnéticas	17
2.1.1. Modelo básico de propagação	17
2.1.2. Atenuação com a distância (<i>Path Loss</i>)	18
2.2. Canal rádio móvel	19
2.2.1. Canal banda estreita	20
2.3. Classificação dos modelos de propagação	21
2.3.1. Propagação em Espaço Livre	21
2.3.2. Propagação em Regiões Urbanizadas	22
2.3.3. Modelo de Hata (Hata-Okumura)	23
2.3.4. Modelo COST 231 estendido de Hata	24
2.3.5. Modelo SUI	25
3 Campanha de Medições	27
3.1. Setup de Transmissão	28
3.1.1. Antenas transmissoras	31
3.1.2. Gerador de sinais	32
3.1.3. Amplificador	34
3.1.4. Conectores e cabos coaxiais	35
3.2. Setup de Recepção	36
3.2.1. Analisador de espectro	37
3.2.2. Amplificador de baixo ruído (LNA – <i>Low Noise Amplifier</i>)	38
3.2.3. GPS (<i>Global Position System</i>)	40
3.3. Parâmetros configurados na recepção e transmissão	41
3.4. Avaliação da situação espectral	42
3.5. Construção do banco de dados	43
4 Análise de Resultados	46
4.1. Atenuação ao longo do percurso	46
4.2. Determinação da perda de propagação em função da distância	48
4.3. Análise da variabilidade de larga escala do sinal	50
4.4. Análise Estatística	53
4.4.1. Análise em larga escala	53
4.4.2. Análise em pequena escala	535
5 Modelagem da Perda de Propagação	63
5.1. Comparação com os modelos existentes	63
5.1.1. Rota Lagoa	64
5.1.2. Rota Leblon	66
5.1.3. Rota Gávea	67

6 Conclusões	70
6.1. Sugestões para Trabalhos Futuros	71
7 Referências bibliográficas	73
8 Apêndice	735

Lista de figuras

Figura 1: Envoltória de um sinal recebido em relação à distância.	20
Figura 2: Rota realizada para varredura de espectro.	27
Figura 3: (a) conjunto TX (b) conjunto RX.	28
Figura 4: Setup de transmissão - Terraço do prédio LEME da PUC-Rio.	29
Figura 5: Localização da antena transmissora no prédio LEME da PUC-Rio.	29
Figura 6: Visão frontal da antena de transmissão.	30
Figura 7: Visão 45° a direita da antena de transmissão.	30
Figura 8: Visão 45° a esquerda da antena de transmissão.	31
Figura 9: Diagramas de irradiação da antena Pctel SP2327-15XP90.	32
Figura 10: Diagramas de irradiação da antena Hyperlink HG3515P-120.	32
Figura 11: Gerador de sinais MG3700A Anritsu.	33
Figura 12: Amplificador Milmega AS0204-7B 2-4GHz 7W.	34
Figura 13: Curva de linearidade do amplificador – 2,487 GHz.	35
Figura 14: Curva de linearidade do amplificador – 3,430 GHz.	35
Figura 15: Cabo coaxial LMR-400 - Características Elétricas.	36
Figura 16: Setup de recepção instalado na viatura.	36
Figura 17: Antena receptora na viatura.	37
Figura 18: Analisador de espectro MS2781B <i>Signature</i> Anritsu.	38
Figura 19: Amplificador de baixo ruído (LNA).	39
Figura 20: GPS.	40
Figura 21: Varredura de espectro (2,5GHz).	43
Figura 22: Varredura de espectro (3,5GHz).	43
Figura 23: Rotas Lagoa, Leblon e Gávea.	46
Figura 24: Valores de potência recebida (dBm) - 3,5 GHz.	47
Figura 25: Valores de potência recebida (dBm) - 3,5 GHz.	47
Figura 26: Perda vs distância em 2,5 GHz.	48
Figura 27: Perda vs distância em 3,5 GHz.	49
Figura 28: TEB x C/I - Detecção coerente com codificação diferencial.	50
Figura 29: Ajuste da perda com a distância em 2,5GHz.	51
Figura 30: Ajuste da perda com a distância em 3,5GHz.	52
Figura 31: FDP e CDF da perda de potência em 2,5GHz - LOS.	54

Figura 32: FDP e CDF da perda de potência em 2,5GHz - NLOS.	54
Figura 33: FDP e CDF da perda de potência em 3,5GHz - LOS.	54
Figura 34: FDP e CDF da perda de potência em 3,5GHz - NLOS.	55
Figura 35: Trecho 1 - Região em linha de visada.	56
Figura 36: Trecho 1 em 2,5 GHz.	57
Figura 37: Trecho 1 em 3,5 GHz.	57
Figura 38: Trecho 2 - Região sem linha de visada.	58
Figura 39: Trecho 2 em 2,5 GHz.	58
Figura 40: Trecho 2 em 3,5 GHz.	59
Figura 41: Trecho 3 - Região em linha de visada.	59
Figura 42: Trecho 3 em 2,5 GHz.	60
Figura 43: Trecho 3 em 3,5 GHz.	60
Figura 44: Trecho 4 - Região sem linha de visada.	61
Figura 45: Trecho 4 em 2,5 GHz.	61
Figura 46: Trecho 4 em 3,5 GHz.	62
Figura 47: Trecho 5 - Região sem linha de visada.	62
Figura 48: Trecho 5 em 2,5 GHz.	63
Figura 49: Trecho 5 em 3,5 GHz.	63
Figura 50: Modelos Empíricos aplicados a rota Lagoa - 2,5GHz.	65
Figura 51: Modelos Empíricos aplicados a rota Leblon - 2,5GHz.	65
Figura 52: Modelos Empíricos aplicados a rota Gávea - 2,5GHz.	66
Figura 53: Modelos Empíricos aplicados a rota Lagoa - 3,5GHz.	67
Figura 54: Modelos Empíricos aplicados a rota Leblon - 3,5GHz.	68
Figura 55: Modelos Empíricos aplicados a rota Gávea - 3,5GHz.	68

Lista de tabelas

Tabela 1: Perda de percurso para diferentes ambiente.	22
Tabela 2: Modelo Hata-Okumura.	24
Tabela 3: Modelo COST 231 Estendido de Hata.	24
Tabela 4: Modelo SUI.	25
Tabela 5: Parâmetros do modelo SUI.	26
Tabela 6: Especificações das antenas TX.	31
Tabela 7: Parâmetros dos setups de transmissão e recepção.	41
Tabela 8: Linha de arquivo de medições armazenado.	43
Tabela 9: Exemplo de arquivo de medição processado.	45
Tabela 10: Fator de atenuação (n).	52
Tabela 11: Resumo comparativo do desvio padrão e erro médio quadrático.	55
Tabela 12: Limites de utilização dos modelos para ambiente externo.	64
Tabela 13: Comparação entre modelos de propagação para ambiente externo.	65

Introdução

O primeiro uso bem sucedido do canal rádio móvel ocorreu no final do século 19, quando Marconi estabeleceu um *link* rádio entre uma estação em terra e um rebocador, em um percurso de mais de 28 km. Desde então, os sistemas móveis têm se desenvolvido e expandido consideravelmente. Sua utilidade foi reconhecida, inicialmente, pelos serviços de segurança pública (polícia, corpo de bombeiros, proteção de áreas florestais, manutenção de rodovias e etc.), seguido pelo setor privado (energia elétrica, petróleo, indústria do cinema, serviços de transporte e etc.). A taxa de crescimento desses serviços nos Estados Unidos na década de 50 era maior que 20% ao ano. Já em 1963, o número de usuários ultrapassava 1,3 milhões, apesar de somente poucos canais estarem disponíveis. [1]

Apesar da demanda para serviços móveis aumentar continuamente por muitos anos, pesquisas com rádio móveis para desenvolvimento de sistemas com requisitos específicos operacionais e técnicos, era uma atividade em menor escala no plano internacional até meados da década de 60. [2]

Adicionalmente, era nítido que os sistemas existentes tinham atingido os limites de desenvolvimento suportados pela tecnologia daquele tempo. Estes fatores, entre outros, tornaram claro que um maior esforço estratégico em pesquisa era necessário e os resultados destas pesquisas são, atualmente, evidentes em todos os lugares minimamente desenvolvidos do mundo, onde o público, em geral, tem acesso aos serviços móveis de telefonia e transmissão de dados, utilizando as mais diversas tecnologias. Dentre todas as atividades de pesquisa conduzidas ao longo dos anos, aquelas que envolvem caracterização e modelagem do canal rádio estão entre as mais importantes e fundamentais. O canal de propagação está relacionado com muitos dos problemas e limitações que envolvem os sistemas rádio móveis. Um exemplo é a propagação multipercurso, que é a principal característica do canal rádio móvel e é causada pela reflexão, difração e espalhamento nas irregularidades de terrenos e obstáculos.

Dessa forma, a caracterização do canal rádio móvel é essencial para o desenvolvimento dos sistemas de comunicações de qualquer tecnologia de comunicação sem fio, minimizando custos de planejamento e implementação. Uma predição de cobertura bem elaborada favorece o uso eficiente do espectro de frequência, sendo este um aspecto chave para dar vazão ao aumento expressivo das densidades de usuários.

Devido à importância da caracterização do canal rádio móvel, esta dissertação tem como objetivo a caracterização estatística do canal de propagação nas faixas de 2,5 GHz e 3,5 GHz, através de duas campanhas de medições *outdoor* em condições que se aproximam daquelas em que novos serviços móveis banda larga operam. Serão obtidos a perda média de propagação para a região de estudo considerada como sendo urbana densa, análise estatística desta perda numa esfera macrocelular.

1.1

Justificativas e motivações do trabalho

Este trabalho está centrado na caracterização do ambiente de propagação rádio móvel e a análise dos modelos de predição de cobertura utilizados nos sistemas sem fio, nas faixas de 2,5 GHz e 3,5 GHz. Sendo assim, os principais objetivos são:

- Realizar medições experimentais, em região urbana, na faixa de frequência de 2,5 GHz e 3,5 GHz;
- Montar uma base de dados de informações de medições nas faixas de 2,5 GHz e 3,5 GHz;
- Utilizar ferramentas de pós-processamento de dados que permitam a caracterização do canal de rádio propagação móvel;
- Obter o comportamento dos modelos de previsão de cobertura aplicáveis às tecnologias WiMAX e LTE nas faixas de frequências de 2,5 GHz e 3,5 GHz;

1.2

Estrutura da dissertação

O presente trabalho foi desenvolvido e está organizado da seguinte forma:

- O capítulo 1 apresenta uma breve introdução com justificativas e motivações do trabalho;
- O capítulo 2 apresenta as teorias de propagação no canal rádio móvel e os modelos de propagação que serão úteis na predição do valor médio do sinal recebido para análise em bandas estreita, procurando sintetizar os principais aspectos e aprofundar naqueles que serão necessários para atingir os objetivos desta Dissertação;
- O capítulo 3 apresenta a configuração dos sistemas de transmissão e recepção, utilizados nas medições descrevendo o ambiente, o planejamento das medições, a montagem dos equipamentos para a realização dos testes e os principais parâmetros de configuração;
- O capítulo 4 apresenta os resultados das medições realizadas e a análise destes resultados;
- O capítulo 5 apresenta uma comparação do sinal recebido com os modelos de propagação da literatura e propostas de ajuste dos modelos, que melhor representa a propagação no ambiente estudado.
- O capítulo 6 apresenta as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

Radio Propagação Móvel

No planejamento da cobertura das estações dos sistemas móveis é essencial estimar os níveis do sinal recebido. Tal previsão abrange a estimativa do valor médio e da variância em torno da média e, para isso, é necessário que os modelos de propagação se aproximem ao máximo da realidade. Grande parte dos modelos de previsão de cobertura gera a média do sinal recebido, porém a abordagem do problema da estimativa do sinal não pode ser realizada somente no modo determinístico. Para o desenvolvimento de modelos que estimam corretamente o sinal recebido, é necessário o conhecimento dos diversos fatores que influenciam a propagação em ambiente rádio móvel. O canal de rádio propagação tem natureza aleatória e depende do sistema e da faixa de frequência utilizada, o que dificulta sua caracterização e modelagem. Além disso, devem ser considerados os mecanismos de propagação que permitem o cálculo do valor mediano do sinal recebido a certa distância do transmissor e os efeitos de propagação que são responsáveis pelas variações aleatórias do nível de sinal em relação ao valor mediano.

Na propagação em comunicações móveis os sinais sofrem perdas de percurso, que inclui as perdas associadas ao relevo do terreno e ao efeito do espalhamento no percurso até o receptor. Por conseguinte, torna-se necessário avaliar os mecanismos de propagação que definam o valor médio do sinal no receptor a atenuação de propagação no enlace. O estudo dos mecanismos de propagação e seus efeitos são necessários e fundamentais para o planejamento e cálculo do raio de uma célula, e por esse motivo, serão apresentados a seguir.

A determinação das características de propagação, dos mecanismos e de seus efeitos, e das distribuições estatísticas adequadas é importante para prever o comportamento do sinal no meio de propagação [2], [3], [4].

2.1

Propagação de ondas eletromagnéticas

O estudo da propagação de ondas eletromagnéticas tem, por objetivo principal, a obtenção do nível do sinal em determinado local ou posição geográfica [3], [5] e [6].

Diversos pesquisadores realizaram estudos e propuseram modelos de propagação que são mais adequados a determinado terreno, ambiente, condições climáticas e faixa de frequências específica, uma vez que estes fatores podem alterar de modo significativo o comportamento da propagação da onda eletromagnética e os resultados obtidos do modelo.

2.1.1

Modelo básico de propagação

Uma onda eletromagnética que se propaga no espaço irá se espalhar em diversas direções de acordo com as características direcionais do elemento irradiador, ou seja, em função do diagrama de irradiação da antena. Quando a frequência é muito elevada, uma descrição simplificada da direção de propagação da onda pode ser feita utilizando a teoria de raios (óptica geométrica), na qual uma frente de onda se desloca em uma direção retilínea, a partir do ponto de irradiação. Se considerarmos um radiador isotrópico em ambiente sem obstáculos, de qualquer natureza, a perda do sinal no percurso entre transmissor e receptor, poderá ser calculada por:

$$\frac{P_t}{P_r} = G_T G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 = G_T G_R \left(\frac{c}{4\pi f d} \right)^2 \quad (2.1)$$

Onde:

P_t : potência de transmissão;

P_r : potência do sinal recebido;

G_t : ganho da antena transmissora;

G_r : ganho da antena receptora;

λ : comprimento de onda (em metros);

d : distância horizontal entre o ponto de transmissão e recepção (em metros);

c : velocidade da luz ($=3 \times 10^8$ m/s);

f : frequência do sinal (MHz).

Esta expressão, também conhecida como fórmula de Friis, considera a existência de somente um percurso entre a antena de transmissão e a antena de recepção e possibilita o cálculo da atenuação de espaço livre. A relação P_t/P_r também pode ser vista como a perda de transmissão no espaço livre que, na escala de decibéis, é dada por:

$$L_{el}(dB) = 10 \log_{10} \left(\frac{P_t}{P_r} \right) \quad (2.2)$$

Considerando antenas isotrópicas, a perda básica de transmissão no espaço livre pode ser obtida por:

$$L_{el}(dB) = 32,44 + 20 \log_{10} f(MHz) + 20 \log_{10} d(Km) \quad (2.3)$$

Se a superfície da Terra for considerada plana, dependendo do diagrama de irradiação da antena, poderá ocorrer reflexão do sinal. Utilizando a teoria de raios, uma reflexão poderá alcançar o ponto de recepção fazendo com que surja uma interação entre o sinal direto e o refletido, sendo esta interação considerada na teoria de dois raios, proposta por Norton. Esta interação ou interferência ocorrerá na amplitude e na fase dos sinais. Na antena receptora, estes sinais serão combinados fazendo surgir uma envoltória resultante, que poderá apresentar amplitude maior ou menor em relação ao sinal direto, dependendo do coeficiente de reflexão da superfície da Terra e da diferença de percurso. Para distâncias muito grandes, deverá ser considerada a curvatura da superfície da Terra e o efeito da onda refletida na superfície será reduzido devido à divergência do sinal [7].

2.1.2

Atenuação com a distância (*Path Loss*)

Em um ambiente rádio móvel, conforme a onda se afasta da antena transmissora diminui a densidade de potência ou nível de sinal recebido, ou seja, a atenuação vai ocorrer mesmo no vácuo pela abertura ou espalhamento da energia conforme a onda se propaga. Os modelos de predição indicam que a média do

signal recebido decai de forma logarítmica com o aumento da distância. Por tanto, a atenuação média para uma distancia d qualquer entre o transmissor e receptor é mostrada pelas equações 2.4 e 2.5 a seguir:

$$\overline{PL}(d) \propto \left(\frac{d}{d_0} \right)^n \quad (2.4)$$

ou

$$\overline{PL}(d)_{[dB]} = \overline{PL}(d_0) + 10n \log \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad (2.5)$$

onde o expoente n representa a taxa com a qual a atenuação aumenta com a distância, d_0 é uma distância de referência ao transmissor (em metros), d é a distância entre transmissor e receptor (em metros) e $PL(d_0)$ é a atenuação de espaço livre. Quando desenhada numa escala logarítmica, a atenuação se aproxima de uma reta com ângulo de inclinação de $10n$ dB. O valor de n depende do cenário de propagação e possui valores típicos entre 2 e 5, sendo igual a 2 para a atenuação no espaço livre.

2.2

Canal rádio móvel

O canal rádio móvel, claramente, limita o desempenho dos sistemas de comunicação. Para determinar os métodos de mitigação das variações causadas, especialmente, pelos multipercursos, é essencial que o canal seja adequadamente caracterizado [2]. Podemos dividir a caracterização do canal em: banda estreita e banda larga.

O tipo de medição depende dos parâmetros do canal que serão analisados. Na sondagem banda estreita, é possível verificar as variações espacial e temporal do sinal, identificando as distribuições estatísticas que melhor se ajustam à variabilidade lenta e rápida do sinal. Na sondagem banda larga, é possível obter os parâmetros de dispersão temporal e espectral, como o espalhamento de retardos, a banda de coerência, o espalhamento Doppler e o tempo de coerência.

2.2.1

Canal banda estreita

A caracterização do canal de propagação rádio móvel em banda estreita é essencial na determinação do tamanho das células, do nível de interferência no receptor e na melhor localização das antenas de transmissão.

Usualmente, para caracterizar o canal em banda estreita é utilizada uma descrição do canal que inclui uma perda média que aumenta linearmente com o logaritmo da distância ao transmissor, um desvanecimento em pequena escala com distribuição de Rayleigh ou de Rice e um desvanecimento em larga escala com distribuição lognormal [8]. Para isso, transmite-se um tom CW sendo realizada a sondagem do canal em apenas uma frequência. Assim, é possível analisar as flutuações do sinal (variação lenta e rápida) e a perda no percurso (*path loss*). A Figura 1 ilustra um sinal de variação rápida, medido em um ambiente particular, onde podem ser vistos, também, o sinal de variação lenta e a perda no percurso.

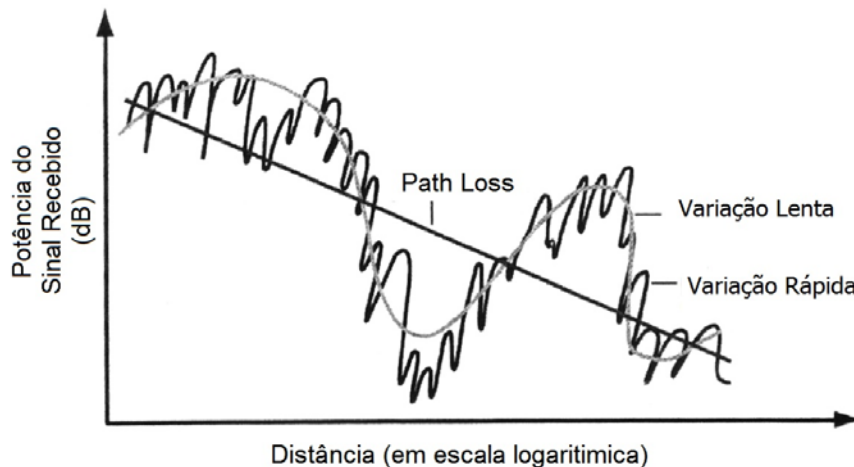


Figura 1: Envoltória de um sinal recebido em relação à distância

A variação rápida do sinal é causada, principalmente, pela propagação em multipercurso. Diversos modelos foram propostos para analisar este fenômeno. Para tais modelos, que buscam caracterizar apenas a variabilidade rápida, consideram-se pequenos trechos correspondentes a um intervalo de 20 a 40λ onde, segundo Lee [9], a variação lenta é praticamente constante.

Na análise da variação lenta do sinal e da perda com a distância, os resultados das medições são comparados com os modelos de propagação em larga escala. Existe uma variedade muito grande de modelos de predição na literatura, tanto para ambientes externos (*outdoor*) quanto para ambientes internos (*indoor*). Mais adiante serão descritos os parâmetros dos modelos utilizados neste trabalho.

2.3

Classificação dos modelos de propagação

Na maioria dos casos de interesse prático, o terreno sobre o qual se dá a propagação apresenta topografia variada, vegetação e construções distribuídas de forma aleatória. Embora o cálculo da perda de propagação possa ser realizado, ainda que com precisão limitada, utilizando métodos numéricos (como traçado de raios) ou soluções para aproximações da equação de onda (como a equação parabólica), os modelos mais utilizados para cálculo de cobertura são semi-empíricos ou empíricos. Dessa maneira, um modelo de propagação pode ser definido com um conjunto de expressões matemáticas, diagramas e algoritmos utilizados para representar as características de um radioenlace que devem levar em consideração o ambiente. Os modelos de propagação têm grande utilidade no planejamento de cobertura de um sistema para localização das estações rádio base.

2.3.1

Propagação em Espaço Livre

O modelo de propagação de espaço livre é usado para prever a atenuação de potência do sinal na ausência de qualquer obstáculo, em função da distância entre o transmissor e o receptor e a frequência de operação. A atenuação de propagação é dada por [5].

$$A_{prop}(dB) = 10 \times \log_{10} \left(\frac{P_t}{P_r} \right) = -10 \times \log_{10} \left[\left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 G_T G_R \right] \quad (2.16)$$

onde P_t é a potência de transmissão, P_r é a potência de recepção, G_t é o ganho da antena de transmissão, G_r é o ganho da antena de recepção, λ é o comprimento de onda, em metros, e d é a distância entre o transmissor e o receptor, em metros.

No caso de antenas serem isotrópicas, ou seja, $G_t=G_r=1$, a atenuação devido à propagação no espaço livre A_o é calculada pela seguinte equação:

$$A_o = 32,4 + 20\log(d)_{[km]} + 20\log(f)_{[MHz]} \quad (2.17)$$

onde A_o é o valor médio da atenuação no espaço livre devido ao caminho de propagação (dB), f é a frequência da portadora e d é a distância entre o transmissor e o receptor.

2.3.2

Propagação em Regiões Urbanizadas

Observa-se que a perda de percurso é tipicamente modelada como função linear do logaritmo da distância entre o móvel e o transmissor com um fator de atenuação que depende do tipo de ambiente. Valores típicos do fator de atenuação para diferentes ambientes são mostrados na tabela 1.

Tabela 1: Perda de percurso para diferentes ambientes [2]

Ambiente	Expoente da perda de percurso (n)
Espaço livre	2
Áreas urbanas	2,7 a 3,5
Áreas urbanas com sombreamento	3 a 5
Dentro de construções em linha de visada (LOS)	1,6 a 1,8
Dentro de construções com obstrução (NLOS)	4 a 6

Um procedimento, a partir das medições obtidas em campo, para determinação do fator de atenuação n foi desenvolvido em [10] a partir da conclusão de que a perda de percurso global é descrita por:

$$y = a + Kx \quad (2.18)$$

onde:

- y representa a perda média de percurso;
- a representa a perda de percurso numa distância de referencia d_0 próxima do transmissor (geralmente 100 metros);
- $K=10n$ representa a inclinação da reta, sendo n o fator de atenuação procurado; e
- x é o logaritmo da distância em cada i -ésimo ponto onde o sinal foi medido.

Sabe-se que a partir dos valores de cada ponto medido, não haverá um único valor de a e de K que satisfaçam todas as equações geradas. Por esse motivo, o procedimento descrito por [10] permite a obtenção da equação da reta de perda de potência com a distância que melhor se ajusta a todos os dados medidos. A partir daí, é possível obter um valor único para os parâmetros a e K .

2.3.3

Modelo de Hata (Hata-Okumura)

O modelo de Hata [11] é uma formulação analítica do modelo empírico gráfico de Okumura [12] e é o mais utilizado para predição e simulação de atenuação de propagação em ambiente macro-celular por cobrir áreas maiores que 1 km. O modelo de Hata-Okumura leva em consideração a morfologia para diferentes ambientes de propagação como área urbana densa, área urbana, área suburbana, área rural e áreas abertas. A tabela 2 mostra a formulação do modelo:

Tabela 2: Modelo Hata-Okumura [11], [12]

Aplicação	Formulação
Áreas Urbanas	Valor médio da perda de propagação de uma área urbana
	$A_{prop}(dB) = 69,55 + 26,16 \times \log(f_c) - 13,82 \times \log(h_{te}) - a(h_{re}) + (44,9 - 6,55 \times \log(h_{te})) \times \log(d)$
Cidades pequenas e médias	Fator de correção para altura efetiva da antena
	$a(h_{re}) = (1,1 \times \log(f) - 0,7)h_{re} - (1,56 \times \log(f) - 0,8)$
Cidades grandes	Fator de correção para altura efetiva da antena
	$a(h_{re}) = 8,29 \times (\log(1,54 \times h_{re}))^2 - 1,1 \quad f \leq 300 \text{ MHz}$
	$a(h_{re}) = 3,2 \times (\log(11,75 \times h_{re}))^2 - 4,97 \quad f > 300 \text{ MHz}$
Áreas suburbanas	$A_{prop}(dB) = A_{prop}(urbana) - 2(\log(f/28))^2 - 5,4$
Áreas rurais	$A_{prop}(dB) = A_{prop}(urbana) - 4,78(\log(f))^2 + 18,3 \log(f) - 40,9$

onde:

- Fator de correção ($a(h_{re})$): depende do meio ambiente;
- Frequência (f): de 150 a 1500 MHz;
- Distância (d): de 1 a 20 km;
- Altura efetiva da antena transmissora (h_{te}): de 30 a 200 m;
- Altura efetiva da antena receptora (h_{re}): de 1 a 10 m.

2.3.4

Modelo COST 231 estendido de Hata

Este modelo é a extensão do modelo de Hata para a faixa até 2 GHz. As variáveis são as mesmas utilizados no modelo Hata-Okumura. A tabela 3 mostra a formulação do modelo:

Tabela 3: Modelo COST 231 - Estendido de Hata [13]

Aplicação	Formulação
Áreas Urbanas	Valor médio da perda de propagação de uma área urbana
	$A_{prop}(dB) = 46,3 + 33,9 \times \log(f_c) - 13,82 \times \log(h_{te}) - a(h_{re}) + (44,9 - 6,55 \times \log(h_{te})) \times \log(d) + C_M$
Centros metropolitanos	$C_M = 3dB$
Cidades médias e em áreas suburbanas	$C_M = 0$

2.3.5

Modelo SUI

O modelo, proposto originalmente por Erceg [14], foi recomendado, com modificações pelo IEEE no cálculo da perda de percurso para o padrão 802.16 [15]. A tabela 4 mostra a formulação e a tabela 5 os parâmetros do modelo:

Tabela 4: Modelo SUI [15]

Aplicação	Formulação
Perda de percurso	$PL = A + 10\gamma \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + s$, para $d > d_0$
Ponto de intercessão em $d_0 = 100\text{m}$	$A = 20 \log\left(\frac{4\pi d_0}{\lambda}\right)$
Fator de distribuição estatística log-normal	$s = \gamma\sigma$
Desvio padrão de s	$\sigma = \mu_\sigma + \sigma_\sigma$
Variável aleatória Gaussiana que representa o fator de atenuação. Os parâmetros a , b e c são dados em função das características do ambiente e h é a altura da antena da estação base	$\gamma = \left(a - bh + \frac{c}{h}\right) + x\sigma_\gamma$

onde:

- d : distância da estação móvel até a estação base (m);
- λ : comprimento de onda (m);
- x : variável gaussiana de média zero e desvio padrão unitário
- σ_γ : desvio padrão de γ ;
- y : variável gaussiana de média zero e desvio padrão unitário;
- z : variável gaussiana de média zero e desvio padrão unitário;
- μ_σ : média de σ ;
- σ_σ : desvio padrão de σ .

Tabela 5: Parâmetros do Modelo SUI [16]

Parâmetros do modelo	Categorias do Terreno		
	A (Montanhoso/densidades de árvore moderada a alta)	B (Semiplano/densidade de árvore moderada)	C (Plano/densidade de árvore leve)
a	4,6	4,0	3,6
b (m^{-1})	0,0075	0,0065	0,0050
c (m)	12,6	17,1	20,0
σ_γ	0,57	0,75	0,59
μ_σ	10,6	9,6	8,2
σ_σ	2,3	3,0	1,6

3

Campanha de Medições

A campanha de medições foi realizada na cidade do Rio de Janeiro sendo escolhidos os bairros da Lagoa, Leblon e Gávea, ou seja, em ambiente urbano. Foram realizadas duas campanhas de medições para coleta de dados nas frequências de 2,5 GHz e 3,5 GHz. As figuras 2 mostra a rota realizada para varredura de espectro.



Figura 2: Rota realizada para varredura de espectro

Nos dois casos, foi necessária a montagem de um *setup* composto de dois blocos de equipamentos de RF, um relacionado à transmissão dos sinais e outro a recepção. A figura 3 mostra um diagrama esquemático dos dois conjuntos.

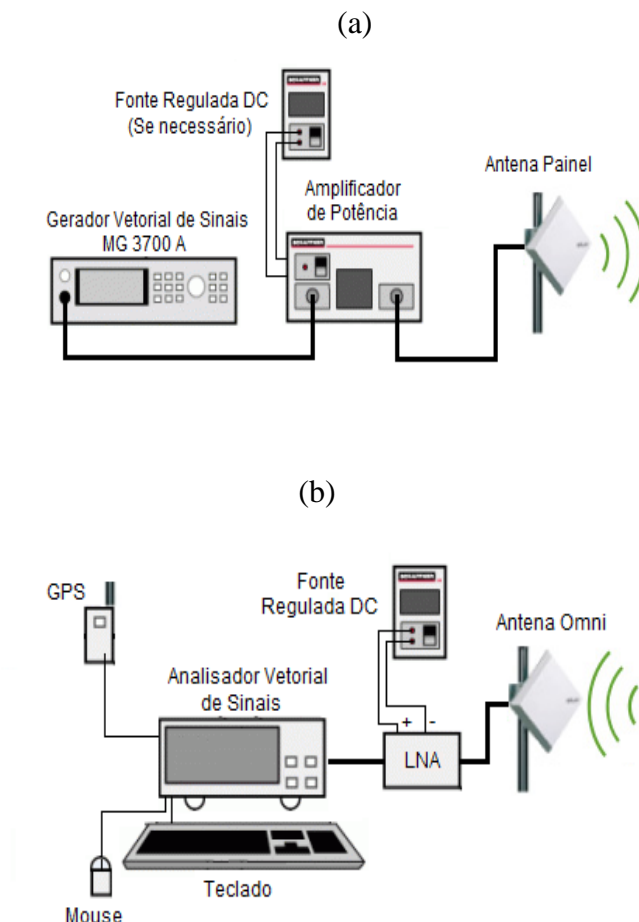


Figura 4: (a) conjunto TX (b) conjunto RX

3.1

Setup de Transmissão

O setup de transmissão utilizou os seguintes equipamentos: um gerador de sinais Anritsu MG3700A, um amplificador de potência Milmega AS0204-7B 2-4 GHz 7W, uma antena setorial Pctel SP2327-15XP90 (2,5GHz) e dois cabos coaxiais (LMR-400 de 5m) interligando o gerador ao amplificador e deste à antena. Além disso, foi necessário uso de um transformador de tensão 110/220 V para alimentação do amplificador de potência, com tensão de entrada de 220 V. Para a segunda campanha foi substituída a antena setorial Pctel pela antena setorial Hyperlink HG3515P-120 (3,5GHz). A situação real é mostrada na figura 4.



Figura 4: Setup de transmissão - Terraço do prédio LEME da PUC-Rio

O local selecionado para a instalação da antena transmissora foi a plataforma localizada no terraço do prédio LEME da PUC-Rio que possui nível mais elevado que os prédios ao seu redor o que oferece cobertura aos bairros citados. A figura 5 mostra a localização da antena transmissora que possui as seguintes coordenadas geográficas: $22^{\circ}58'43.64''$ Latitude Sul e $43^{\circ}13'56.02''$ Longitude Oeste.



Figura 5: Localização da antena transmissora no prédio LEME da PUC-Rio

As visões frontal e periféricas de irradiação da antena estão mostradas nas figuras 6 a 8.



Figura 6: Visão frontal da antena de transmissão



Figura 7: Visão 45° a direita da antena de transmissão



Figura 8: Visão 45° a esquerda da antena de transmissão

3.1.1

Antenas transmissoras

Para irradiar a portadora no ambiente de propagação estudado, foram utilizadas duas antenas setoriais, sendo uma Pctel SP232715XP-90 e outra Hyperlink HG3515P-120. As antenas são de uso típico na implementação em redes de sistemas WiMAX na faixa de 2,5 GHz e 3,5 GHz, respectivamente. Suas características técnicas mais importantes são descritas na tabela a seguir.

Tabela 7: Especificações das antenas TX

	Pctel SP232715XP-90 (Primeira Campanha)	Hyperlink HG3515P-120 (Segunda Campanha)
Abertura do feixe horizontal	90°	120°
Abertura do feixe vertical	5°	8°
Faixa de frequência	2,3 - 2,5 GHz	3,4 - 3,7 GHz
Ganho	16 dBi	15 dBi
Impedância	50 Ω	50 Ω
Máxima potência de entrada	50 W	50 W
Polarização	vertical	Vertical
VSWR	< 1,5	< 1,5
Relação frente/costa	25 dB	21 dB

Os diagramas vertical e horizontal de irradiação das antenas estão apresentados na Figura 9 e 10.

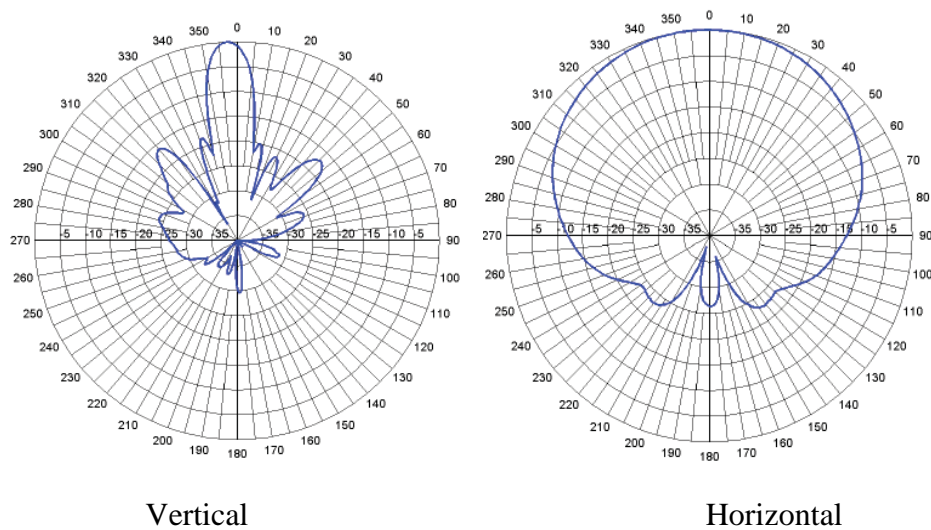


Figura 9: Diagramas de irradiação da antena Pctel SP232715XP-90

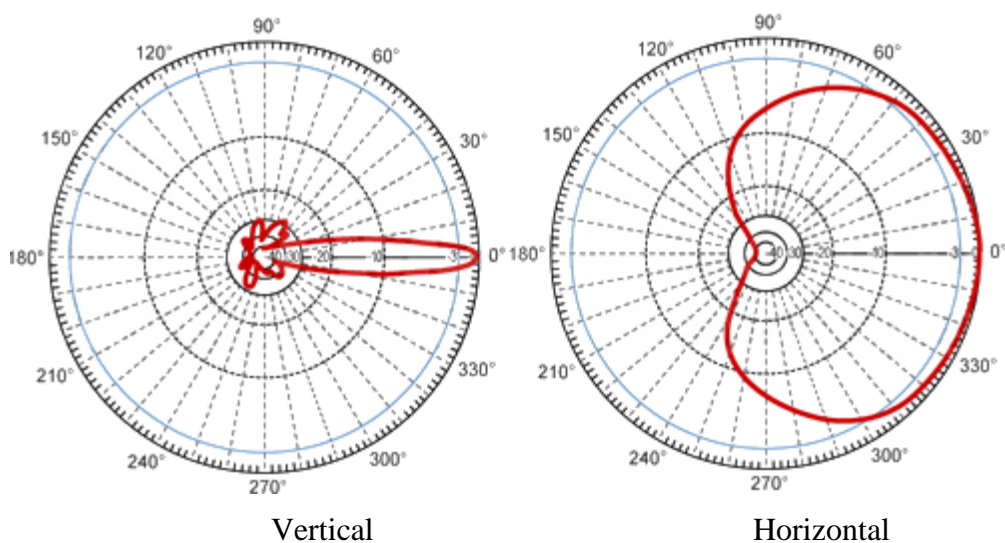


Figura 10: Diagramas de irradiação da antena Hyperlink HG3515P-120

3.1.2

Gerador de sinais

O gerador de sinais MG3700A (Anritsu), mostrado na Figura 11, tem como principal recurso à geração de sinais em banda básica em alta velocidade, permitindo a modulação e transmissão em banda larga.



Figura 11: Gerador de sinais MG3700A Anritsu

Suas principais características são:

- Armazenamento interno de 40 GB;
- Capacidade de buffer elevada (até 512.000 amostras/canal);
- Faixa de frequências de transmissão de 250 kHz a 6 GHz;
- Sinais modulados para os modernos sistemas de comunicação: WCDMA, HSDPA, GSM, EDGE, CDMA2000, 1XEV-DO, WLAN (IEEE 802.11/16), PDC, AWGN, CW;
- Transmissão modulada em banda larga até 150 MHz;
- Transmissão simultânea de dois sinais (desejado/interferente ou desejado/ruído)

O sinal foi gerado por código Matlab desenvolvido em [17] em componentes de fase (I) e quadratura (Q) no formato texto (.txt). Posteriormente, o arquivo foi convertido para o formato (.wvi) exigido pelo Gerador de Sinais MG3700A da Anritsu. Essa conversão foi realizada através do software IQProducer®

3.1.3

Amplificador

A função principal do amplificador de potência Milmega AS0204-7B mostrado na Figura 12, é gerar um ganho na portadora do gerador de sinais e entregá-la a antena para ser irradiada no ambiente de propagação.



Figura 12: Amplificador Milmega AS0204-7B 2-4GHz 7W

O amplificador possui uma potência máxima de saturação e seu ganho varia de acordo com a frequência. Cada frequência possui um nível de saturação para diferentes valores de potência de entrada.

Para que as medições não sejam afetadas pela saturação e por efeitos como harmônicos e interferência gerada pelo equipamento foram levantadas as curvas de linearidade do amplificador para os dois casos, com o mesmo gerador de sinais MG3700A, um atenuador de 30 dB, cabos de RF do tipo LMR-400 e o analisador vetorial de redes MS2781B no modo de análise espectral com a opção de medição de potência de canal. Estas curvas são mostradas nas Figuras 13 e 14.

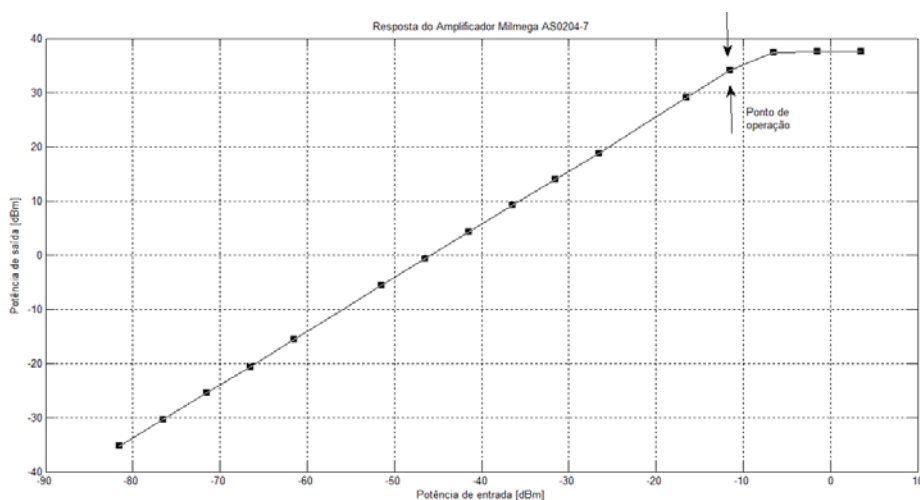


Figura 13: Curva de linearidade do amplificador – 2,487 GHz.

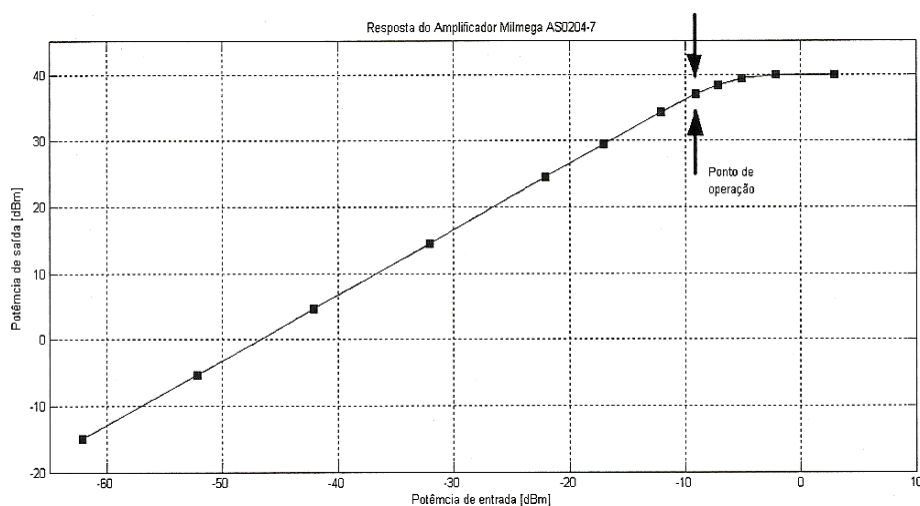


Figura 14: Curva de linearidade do amplificador – 3,430 GHz.

Com estes resultados, a potência de entrada para o amplificador de forma a permanecer na região linear de operação deve ser abaixo de -11dBm e -9 dBm, nas faixas de 3,5 e 2,5 GHz, respectivamente.

3.1.4

Conectores e cabos coaxiais

Foram utilizados conectores e cabos coaxiais para interligar o gerador de sinais ao amplificador e entre este à antena de transmissão. Foi utilizado o cabo LMR-400 e do fabricante *Time Microwave Systems*. As características elétricas do cabo estão apresentadas na figura 15.

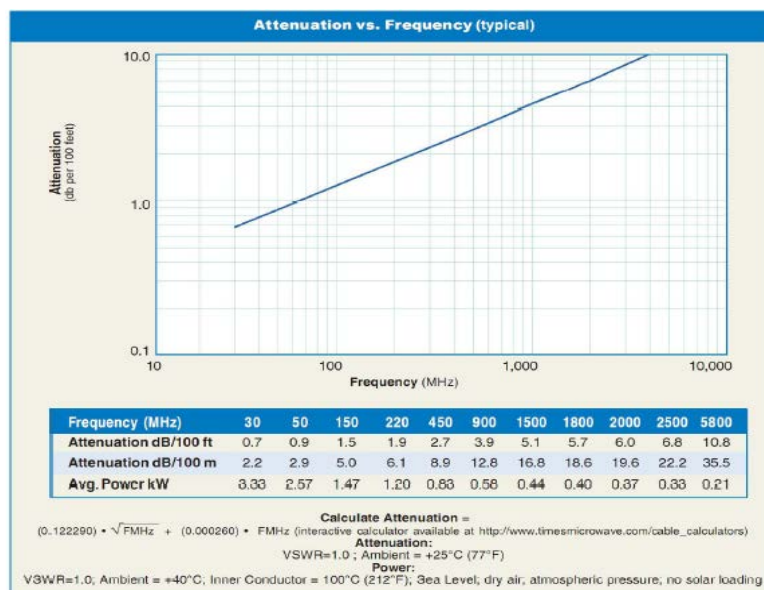


Figura 15: Cabo coaxial LMR-400 - Características Elétricas

3.2

Setup de Recepção

O setup de recepção utilizou um analisador de sinais *Anritsu* MS2781B *Signature* e um amplificador de baixo ruído (LNA) alimentado por uma fonte de tensão DC de 15V conforme mostra a figura 16.



Figura 16: Setup de recepção instalado na viatura

Para aquisição dos sinais e geo-referenciamento dos pontos medidos foi utilizado um GPS (*Garmin*). Além disso, foram utilizadas na primeira campanha uma antena receptora omnidirecional *Mobilemark*, (2,5 GHz) e, na segunda campanha, uma antena receptora omnidirecional *Rubber Duck* (3,5 GHz), ambas com base magnética fixada na parte externa da viatura, conforme mostra a figura 17.



Figura 17: Antena receptora na viatura

3.2.1

Analizador de espectro

O Analizador de espectro MS2781B *Signature* da Anritsu, configurado no modo de captura CW, utilizado como receptor dos sinais é mostrado na Figura 18. Os parâmetros do analisador de espectro foram ajustados para permitir a integração com o Matlab.

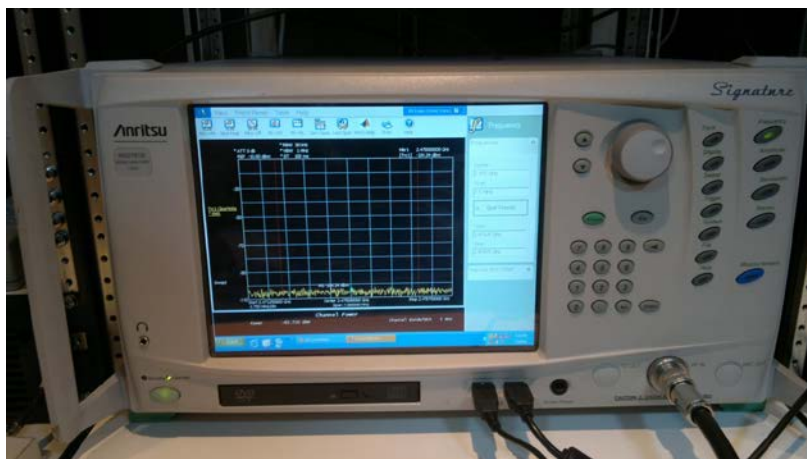


Figura 18: Analisador de espectro MS2781B *Signature* Anritsu

As principais características do analisador de espectro MS2781B *Signature* da Anritsu são:

- Captação de sinais na faixa de 100 Hz até 8 GHz englobando tecnologias como WCDMA, HSDPA, WIMAX fixo e móvel;
- Largura de banda: 1,25 a 20 MHz;
- Modo de duplexação: TDD e FDD;
- Modulação: BPSK (pilotos), QPSK, 16QAM, 64QAM;
- Transformada de Fourier: OFDM 256, OFDMA 128, 512, 1024, 2048.

3.2.2

Amplificador de baixo ruído (LNA – *Low Noise Amplifier*)

Em ambas campanhas de medição foi utilizado um LNA modelo ABL0800-12-3315 da *Wenteq Microwave Corp*, mostrado na Figura 19, de forma que a alimentação do equipamento foi realizada pelo mesmo circuito que alimenta o analisador de espectro e com uma fonte de DC adicional em 12 VDC. Suas principais características técnicas são mostradas a seguir:

- Frequência: 700 – 3500 MHz;
- Ganho: 33 dB (mínimo);
- Figura de Ruído: 2 dB;

- P1dB: 13 dBm (mínimo)
- VSWR: (:1) 2/2 i/o
- Tensão de alimentação: +8 a +12 Vdc
- Corrente: 120 mA (máxima)



Figura 19: Amplificador de baixo ruído (LNA)

Sabe-se que em um amplificador a figura de ruído (F) quantifica a relação sinal-ruído de entrada com a relação sinal-ruído de saída do sistema e é dada por:

$$F(dB) = \left(\frac{S}{N} \right)_e - \left(\frac{S}{N} \right)_s \quad (3.1)$$

Menor será o ruído inserido no sistema quanto menor for o valor da figura de ruído e consequentemente melhor será o ganho de amplificação. Considerando um sistema composto por vários elementos, este terá um acréscimo de ruído em cada estágio. Neste caso, a figura de ruído final será obtida relacionando os ganhos com as figuras de ruído de cada elemento, conforme a equação 4.2.

$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \dots \quad (3.2)$$

Ao se utilizar o LNA após a antena receptora é possível obter um ganho na figura de ruído do sistema. O amplificador de baixo ruído possui figura de ruído de 1 dB e ganho de 30 dB, sendo alimentado por uma fonte de tensão de 15 V.

3.2.3

GPS (Global Position System)

Para a coleta de informações de coordenadas geográficas foi utilizado um equipamento de localização via satélite GPS da marca *Garmin*, modelo GSMAP 62, com opção de conexão de antena magnética externa e captura de dados por meio de cabo USB, com conexão de 9.600 bps. Trata-se de um equipamento navegador de alta sensibilidade de recepção que possui uma base de dados cartográfica e um cartão de memória para armazenamento de mapas e pontos medidos. Para captar as informações utilizou-se o software *GPS Trackmaker* que permite obter atualização da posição geográfica a cada segundo. Através deste software foi possível também estimar o erro de posicionamento EPE (*Estimated Postition Error*) que teve erro médio em torno de 7m em áreas de boa visibilidade aos satélites GPS e 12m em áreas entre prédios e sob árvores. O equipamento é mostrado na Figura 20.



Figura 20: GPS

O relógio do GPS foi integrado ao relógio do analisador de espectro, para cruzamento dos dados medidos com a localização do ponto de medição. Desta forma foi possível verificar o nível do sinal recebido de acordo com a variação da distância entre o receptor e o transmissor, produzindo um arquivo com dados de latitude e longitude.

3.3

Parâmetros configurados na recepção e transmissão

As principais características configuradas no setup de recepção foram:

- Frequência central: 2,487 GHz e 3,430 GHz;
- Spam (varredura do espectro): 100 kHz com visualização de 10 kHz;
- Nível de referência (visualização do eixo horizontal): -20 dBm;
- Interação com o MATLAB = ativado;
- Handshake - troca de informações = ativado;
- RBW - resolução da largura de banda = 300 kHz;
- Tempo de captura (por segundo): 10 ms;
- Amostragem = 428000 amostras/segundo.

A tabela 7 mostra a configuração dos parâmetros no setup de transmissão e recepção.

Tabela 7: Parâmetros dos setups de transmissão e recepção

		2,487 GHz	3,410 GHz
TRANSMISSÃO	Modulação	CW sem modulação	CW sem modulação
	Potência TX	-15 dBm	-15 dBm
	Ganho da Antena	16 dBi	15 dBi
	Ganho do Amplificador	46 dB	45 dB
	Atenuação nos cabos + Perda de acoplamento	3,3 dB	3,3 dB
	Altura da Antena	50 m	50 m
RECEPÇÃO	Potência RX	X dBm	Y dBm
	Ganho da Antena	2 dB	5 dB
	Ganho do LNA	33 dB	29 dB
	Atenuação nos cabos + Perda de acoplamento	2 dB	2 dB
	Altura da Antena	3 m	3 m

Onde X e Y são os valores a ser medido com o laboratório móvel, durante a campanha de medições.

3.4

Avaliação da situação espectral

Antes da realização das duas campanhas de medição foi necessário à identificação das duas faixas de frequências nas quais os testes poderiam ser realizados sem gerar ou receber interferência em outros sistemas. Para isso foi feita uma avaliação inicial através de consulta no banco de dados do SITAR (Sistema de Informações Técnicas para Administração das Radiocomunicações) da Anatel. Através dos valores das coordenadas geográficas do prédio LEME da PUC-Rio e das faixas de frequências validas para os equipamentos de medição (2,3 GHz a 2,7 GHz e 3,4 a 3,6 GHz) foi possível observar no espectro de frequência regiões mais livres para uso, ou seja, que possuem o menor ruído interferente.

Adicionalmente à consulta foram realizadas medições em campo com um analisador vetorial portátil FSH3-6-18 da marca ROHDE & SCHWARTZ no modo analisador de espectros. A partir daí foi possível capturar a situação do espectro num raio de 5 km do local onde a antena transmissora foi instalada. Além disso, foi necessário utilizar o software de interface com o GPS para associar os dois arquivos resultantes (captura e GPS). Para esta associação de arquivos foi realizado o sincronismo do relógio do Sistema Operacional do Analisador Vetorial com o do GPS.

Nas figuras 21 e 22 é possível observar o resultado da varredura de espectro. Os valores de sinais apresentados representam a potência média de entrada no analisador vetorial já considerando as perdas dos elementos do setup de medição (31 dB).

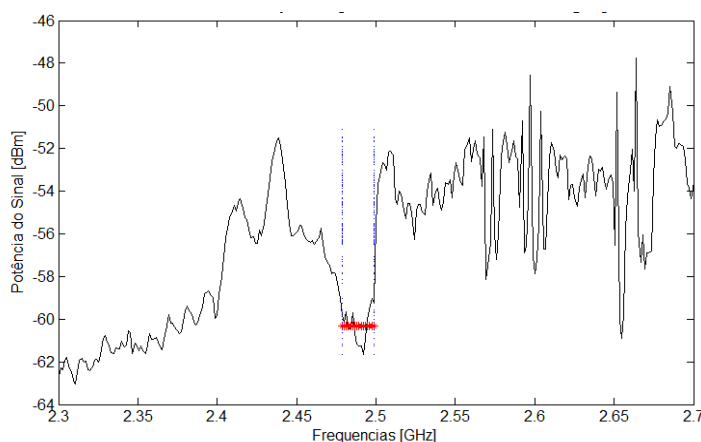


Figura 21: Varredura de espectro (2,5GHz)

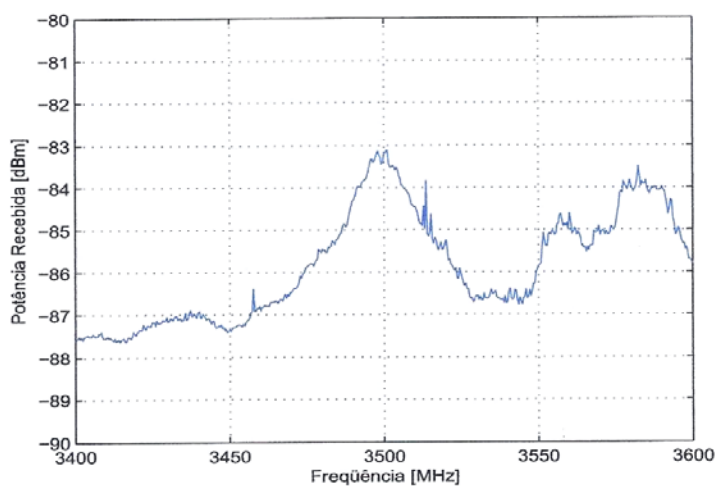


Figura 22: Varredura de espectro (3,5GHz)

Diante do exposto, ficaram definidas as frequências de 2.487 GHz e 3.430 GHz como as frequências centrais de transmissão, ou seja, frequências livres no banco de dados do SITAR e que também apresentaram baixos níveis de ruído na varredura de espectro.

3.5

Construção do banco de dados

O analisador de espectro Anritsu MS2781B, descrito no item 4.2.2, foi configurado para exportar arquivos no formato texto (.txt) com os parâmetros mostrados na tabela 8, onde se pode verificar um exemplo de uma linha da saída do registro de sinal.

Tabela 8: Linha do arquivo de medições armazenado

Ano	Mês	Dia	Hora	Min	Seg	Nível 1 (V)	Nível 8566 (V)
2012	10	17	3	21	54.205	-1.3641e-006- 2.6712e-006i	-9.9047e-007- 3.7113e-007i

O arquivo texto armazenado pelo analisador de espectro representa:

- Colunas 1 a 6: data (ano/mês/dia/hora/minuto/segundo) de cada ponto medido;
- Colunas 7 a 8566: nível do sinal medido (fase e quadratura) em Volts, em janelas de medição de 0,020 segundo;

O critério adotado para aquisição de, aproximadamente, 8.000 amostras por segundo, respeitou algumas condições para análise de variabilidade em faixa estreita [3], [4], [18]. Tal critério pode ser apreciado a seguir:

- Valor mínimo de amostras/segundo configurado no gerador de sinais: 428000 amostras/s;
- Tempo máximo de aquisição de dados configurado no receptor: 0,020 s (para cada segundo);
- Valor total de níveis de potência medidos em um segundo: 428000 amostras/s x 0,020 s = 8560 níveis de potência por segundo;
- Tempo de coleta dos dados, por arquivo: 5800s = 80 min;
- Tamanho do arquivo (.txt) = 1,2GHz;
- Total de arquivos: 1.

Para o processamento dos dados é necessário o cálculo da potência média do sinal (dBW) por segundo. Para isso, transformou-se cada nível medido em watts à relativa potência em dBW (com impedância de acoplamento normalizada = 50 Ω) que pode ser obtida pela equação a seguir:

$$Pr(dBW) = 20\log(W) \quad (3.3)$$

Dessa forma, foi possível atingir a primeira etapa da construção de um banco de dados contendo os níveis de potência medidos, em dBm, conforme mostra a tabela 9.

Tabela 9: Exemplo de arquivo de medição processado

Ano	Mês	Dia	Hora	Min	Seg	Potência Média (dBm)
2012	10	17	2	6	29	-58,184
....
2012	10	17	2	34	6	-105,45

A segunda etapa para construção do banco de dados foi o referenciamento dos arquivos de medições com os arquivos de localização, sendo que o campo data (ano/mês/dia/hora/minuto/segundo) foi a variável de integração e exigiu que os relógios do GPS e do analisador de espectro estivessem sincronizados durante a medição. Após o processamento do arquivo de localização foi possível inserir a posição geográfica (latitude e longitude) no banco de dados. Com isso, houve uma redução do tamanho no arquivo efetivamente medido, devido às restrições impostas pela utilização do GPS.

Com base nos dados de posição (latitude e longitude) foi possível efetuar o cálculo das distâncias dos pontos medidos com relação ao transmissor (desprezando a curvatura da terra, devido à distância máxima alcançada não ultrapassar 3 km) de acordo com a equação a seguir:

$$d(km) = \left(\sqrt{(latTx - latRx)^2 + (longTx - longRx)^2} \right) \times R_{terra} \quad (3.4)$$

onde R_{terra} é o raio da terra ($R_{terra} = 6.371$ km).

4

Análise de Resultados

Neste capítulo serão apresentadas as metodologias utilizadas no pós processamento das medições obtidas durante as campanhas e os principais resultados que permitiram a caracterização dos canais urbano em banda estreita nas faixas de 2,5 GHz e 3,5 GHz. Para tal, o cenário estudado foi dividido em três regiões denominadas: Rota Lagoa, Rota Leblon e Rota Gávea como mostra a figura 23.



Figura 23: Rotas Lagoa, Leblon e Gávea

4.1

Atenuação ao longo do percurso

Os níveis de sinais medidos ao longo dos percursos são apresentados nas figuras 24 e 25 para as faixas de 2,5 e 3,5 GHz, respectivamente.



Figura 24: Valores de potência recebida (dBm) - 2,5 GHz



Figura 25: Valores de potência recebida (dBm) - 3,5 GHz

A análise comparativa entre as duas figuras acima mostra níveis de sinal experimental mais altos na frequência de 2,5 GHz como previsto teoricamente. Observou-se ainda que o nível do sinal em alguns pontos era muito bom, devido à recepção em visada direta (LOS), porém em outros pontos era de nível médio ou baixo, devido à recepção sem visada (NLOS).

Utilizamos os mapas topográfico e morfológico do software NetDimension que, com base nas coordenadas de latitude e longitude de cada ponto medido, oferece o cálculo de potência considerando as componentes do sinal difratadas nos edifícios, permitindo assim a identificação da existência de edificações entre o

transmissor e o receptor em cada ponto da rota. A partir daí, foi possível classificar os pontos medidos em sem linha de visada (NLOS) e com linha de visada (LOS).

4.2

Determinação da perda de propagação em função da distância

A seguir são exibidos os gráficos que representam a dependência do sinal com a distância para as frequências estudadas nesse trabalho. Os valores medidos estão plotados em cores diferentes considerando o sinal sendo com linha de visada (LOS) para a antena transmissora e sem linha de visada (NLOS).

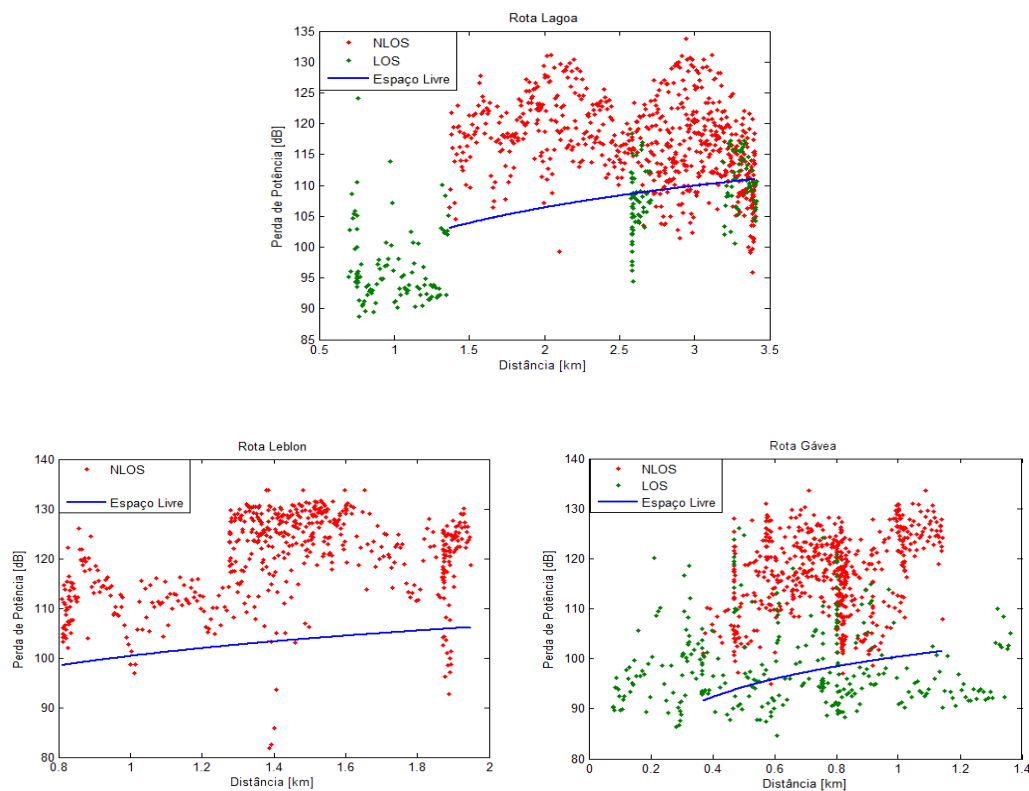


Figura 26: Perda vs distância em 2,5 GHz

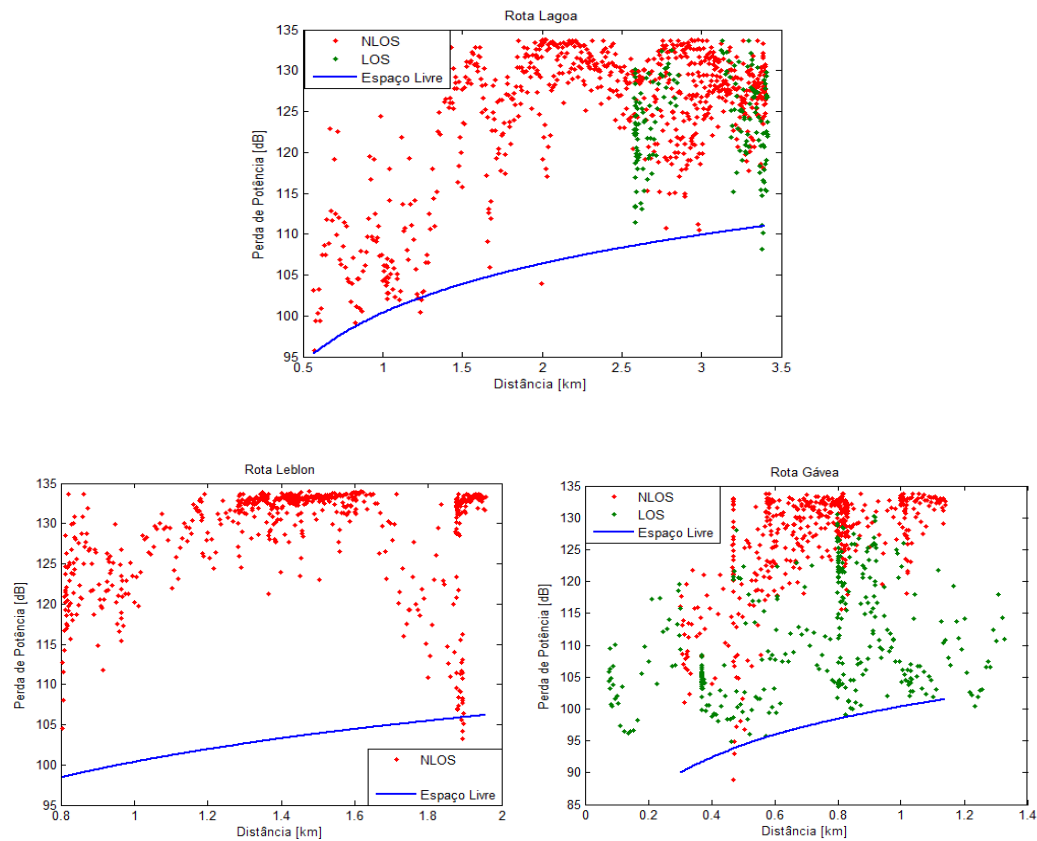


Figura 27: Perda vs distância em 3,5 GHz

A potência de ruído térmico foi utilizada para o calculo do limiar de potência recebida dado pela seguinte expressão, em dBm:

$$P_{RT} = \left(10 \log \frac{KTB}{1.10^{-3}} \right) + F \quad (4.1)$$

onde:

- $K = 1,38 \times 10^{-23}$ J/K (constante de Boltzman);
- T : Temperatura ambiente;
- B : Banda de Transmissão
- F : Figura de Ruído;

Considerando TEB de $10e^{-6}$ e a modulação utilizada 4PSK, a C/I para detecção coerente, consultando as curvas teórico da figura 28, será de 14dB.

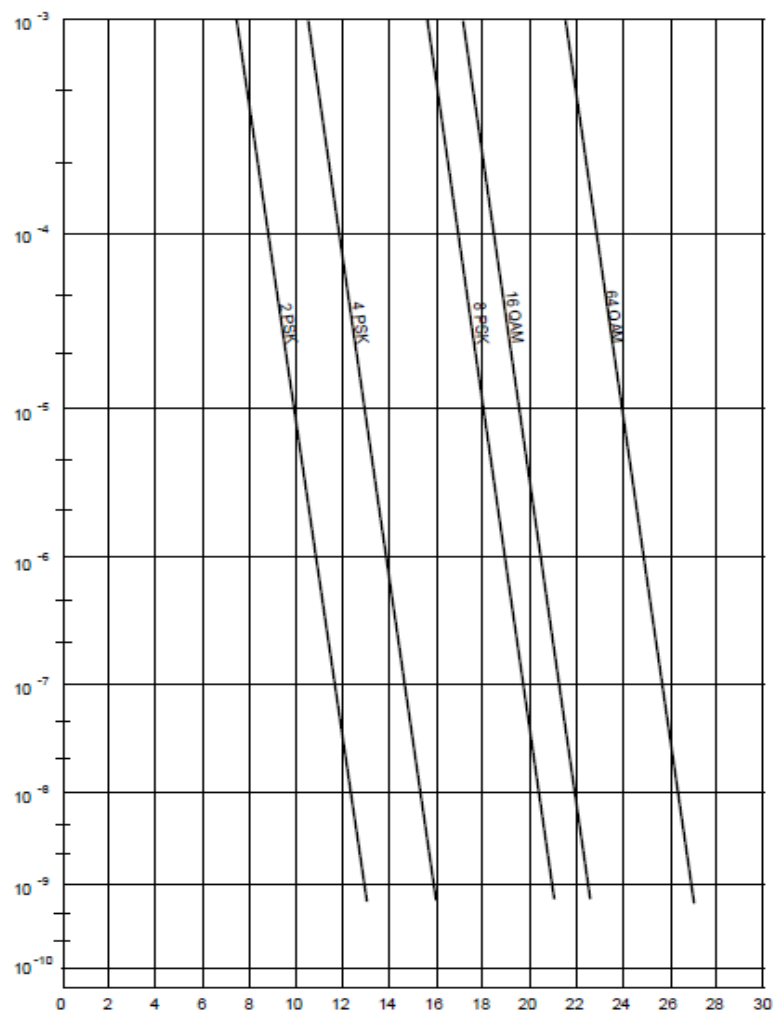


Figura 28: TEB x C/I - Detecção coerente com codificação diferencial

Através da expressão do cálculo do limiar de potência recebida a seguir, foi possível definir o limiar de recepção em -103dBm.

$$P_{RL} = P_{RT} + C/I \quad (4.2)$$

4.3

Análise da variabilidade de larga escala do sinal

A análise da variação em larga escala pode ser realizada após a separação do efeito do desvanecimento de larga escala da dependência com a distância. Segundo Bertoni [3], a metodologia usada para realizar esta separação, consiste em determinar a potência média P em um setor em função da distância R em uma escala logarítmica. Então, uma reta pode ser ajustada aos dados plotados desta

potência média, utilizando o método dos mínimos quadrados. A equação da reta representa a dependência com a distância, sendo dada por:

$$P(R) = 10 \log P_t + 10 \log A - n \log R \quad (4.1)$$

Onde P_t é a potência de transmissão, n é o índice de inclinação e A é o valor da atenuação em $R=1$.

O fator de atenuação foi calculado para as rotas da Lagoa, Leblon e Gávea, mostradas separadamente nas figuras 28 e 29, e os resultados estão sumarizados na Tabela 10.

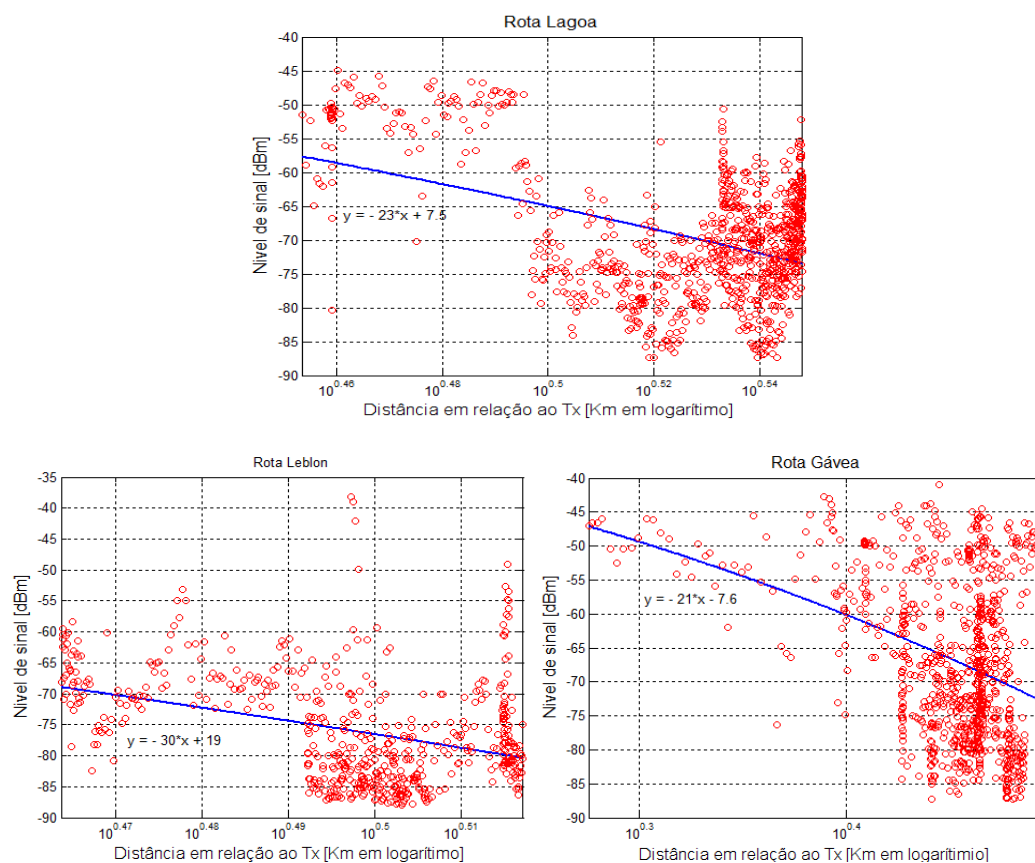


Figura 29: Ajuste da perda com a distância em 2,5GHz

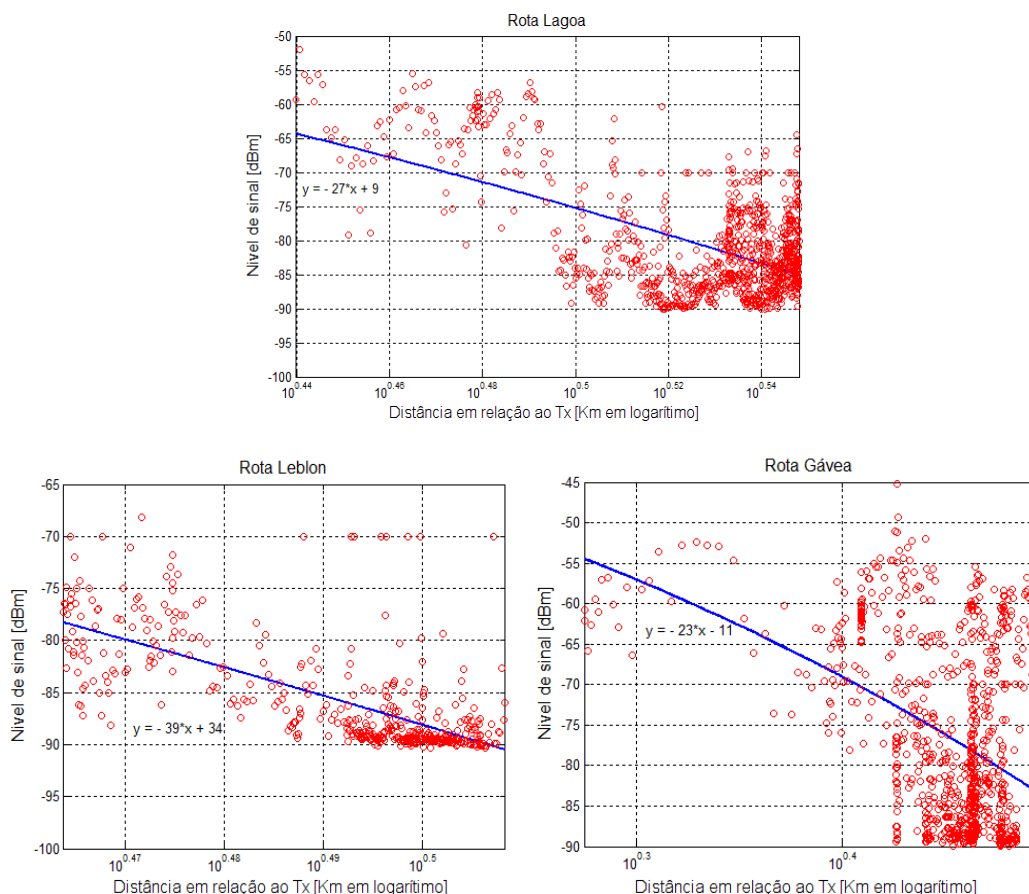


Figura 30: Ajuste da perda com a distância em 3,5GHz

Tabela 10: Fator de atenuação (n)

	n (2,5 GHz)	n (3,5 GHz)
<i>Rota Lagoa</i>	2,26	2,71
<i>Rota Leblon</i>	3,04	3,94
<i>Rota Gávea</i>	2,07	2,28

A tabela 10 confirma a hipótese, para as duas frequências, de que a rota Lagoa tende a um comportamento de canal suburbano devido ao espelho d'água da Lagoa Rodrigo de Freitas, a rota Leblon a um ambiente de construções com obstrução total, ou seja, sem linha de visada (NLOS) e a rota Gávea a um ambiente, na maior parte, com linha de visada (LOS).

4.4

Análise Estatística

Devido ao fato de o canal rádio móvel possuir natureza aleatória sua modelagem matemática deve ser feita com o auxílio de ferramentas estatísticas. Existem inúmeras distribuições de probabilidade que vem sendo utilizadas para prever o comportamento do sinal. Os resultados obtidos pelas medições realizadas em campo nas frequências estudadas, receberam essa análise estatística, e suas funções de distribuição cumulativa (CDF) foram determinadas e comparadas com as funções de distribuição teóricas.

4.4.1

Análise em larga escala

A metodologia comumente utilizada para a análise estatística em larga escala dos dados observados nas medições de campo segue os seguintes passos:

- a) Primeiramente calcula-se o sinal resultante que é definido pela subtração entre o sinal original e a perda média com a distância;
- b) Em seguida, filtra-se o sinal resultante por média móvel com uma janela de 50 metros;
- c) Com isso, é possível obter os histogramas do sinal filtrado a partir dos dados observados, fornecendo uma ideia da forma da distribuição empírica;
- d) Por fim, ajusta-se distribuições teóricas para verificar qual se enquadra melhor.

As Figuras 31 a 34 mostram a comparação entre as distribuições cumulativas da perda de potência com as distribuições teóricas em cada rota.

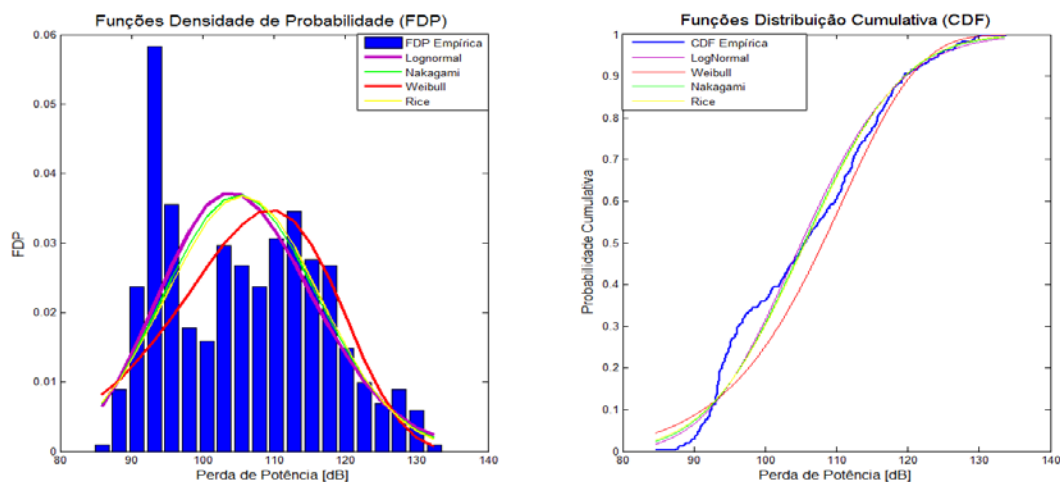


Figura 31: FDP e CDF da perda de potência em 2,5GHz - LOS

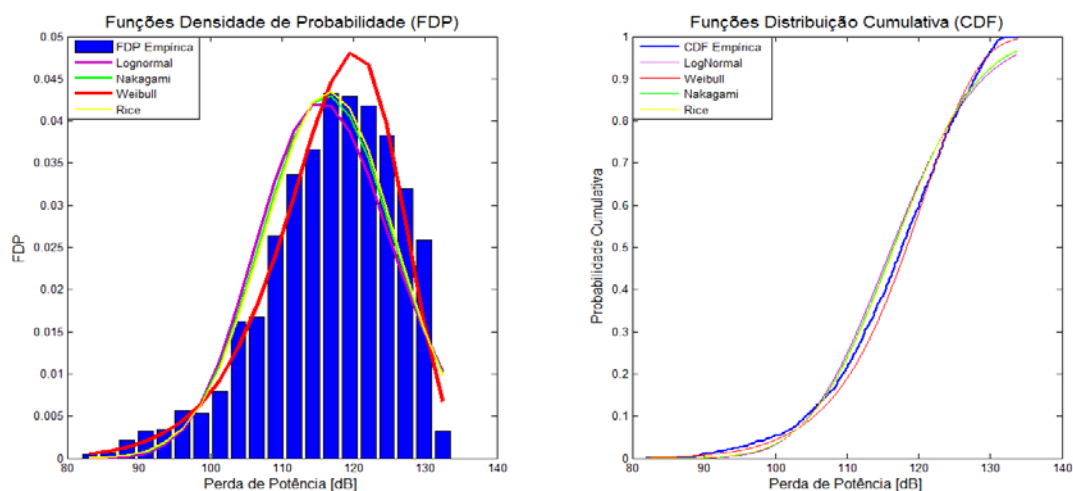


Figura 32: FDP e CDF da perda de potência em 2,5GHz - NLOS

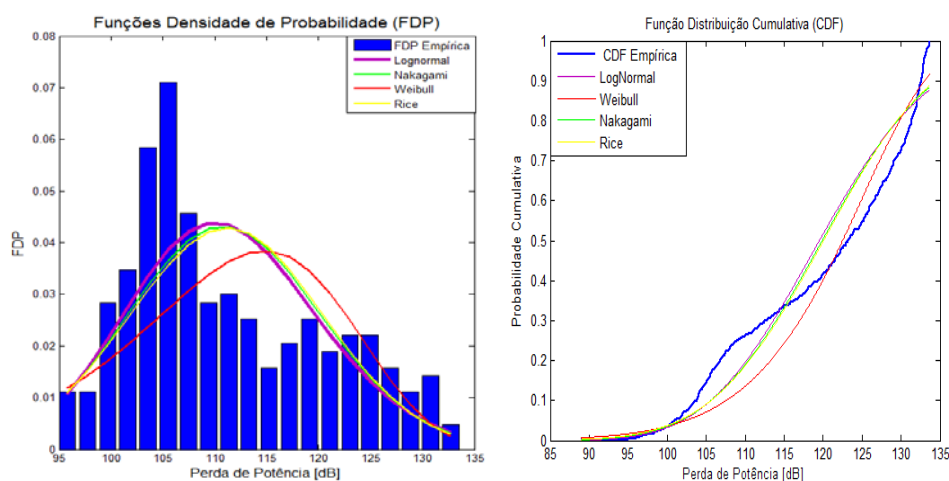


Figura 33: FDP e CDF da perda de potência em 3,5GHz - LOS

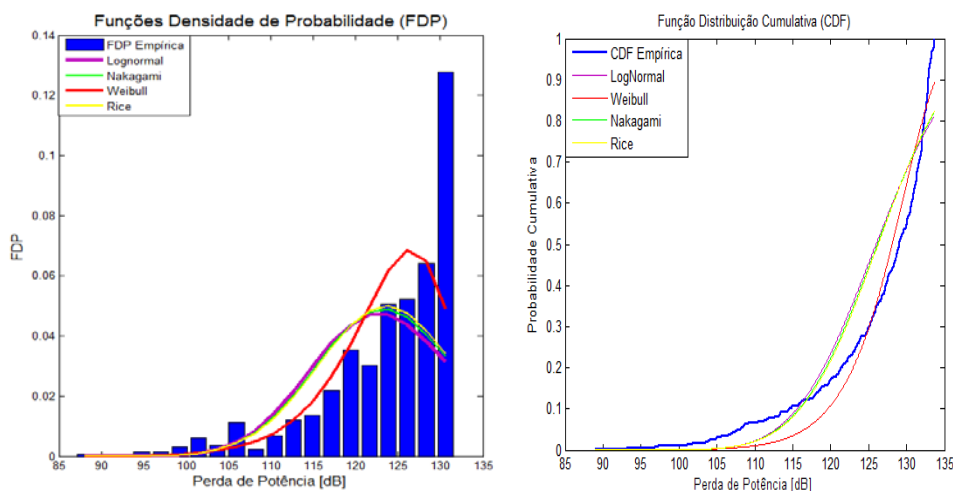


Figura 34: FDP e CDF da perda de potência em 3,5GHz - NLOS

Analisando a tabela 11 é possível validar através do desvio padrão e erro médio quadrático que o sinal medido em linha de visada (LOS) comportou-se, estatisticamente, como uma distribuição LogNormal e o sinal medido sem linha de visada (NLOS) como uma distribuição Weibull.

Tabela 11: Resumo comparativo do desvio padrão e erro médio quadrático

			LogNormal	Nakagami	Weibull	Rice
2,5GHz	Com linha de Visada (LOS)	Desvio Padrão	0.67	0.76	0.68	0.75
		Erro Médio Quadrático	0.13	0.13	0.13	0.13
	Sem linha de Visada (NLOS)	Desvio Padrão	0.48	0.41	0.23	0.38
		Erro Médio Quadrático	0.03	0.02	0.01	0.02
3,5GHz	Com linha de Visada (LOS)	Desvio Padrão	0.99	1.04	1.14	1.06
		Erro Médio Quadrático	0.16	0.18	0.25	0.19
	Sem linha de Visada (NLOS)	Desvio Padrão	1.17	1.11	0.81	1.07
		Erro Médio Quadrático	0.55	0.52	0.35	0.51

4.4.2

Análise em pequena escala

A metodologia utilizada, para a análise em pequena escala, seguiu as seguintes etapas:

- Foi realizado os mesmos procedimentos dos itens a) e b) da análise em larga escala;

- b) Em seguida, subtrai-se o sinal resultante do sinal filtrado. Ambos obtidos na análise em larga escala;
- c) A partir do resultado, obtêm-se os histogramas que, da mesma forma, fornece uma ideia da forma da distribuição empírica;
- d) Por fim, igualmente a análise em larga escala, ajusta-se distribuições teóricas para verificar qual se enquadra melhor.

As seguir são escolhidos cinco diferentes trechos cujos gráficos mostram a comparação entre as distribuições cumulativas da tensão do sinal, valores normalizados em volts, com as distribuições teóricas. As distribuições dos dados medidos serão apresentados em histogramas, enquanto as funções de densidade de probabilidade teóricas serão mostradas em curvas. Para esses cálculos, os parâmetros de cada distribuição foi determinado por estimação de máxima verossimilhança (MLE, do inglês *Maximum-Likelihood Estimation*), através do comando '*mle*' do programa MATLAB que realiza essa estimação com intervalo de confiança de 95%.

O trecho 1 foi definido como sendo parte da Av. Padre Leonel França e sua continuação Av. Mario Ribeiro.

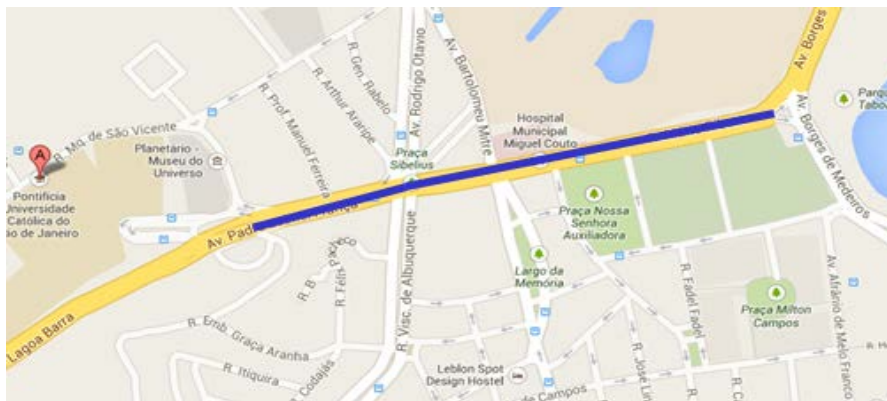
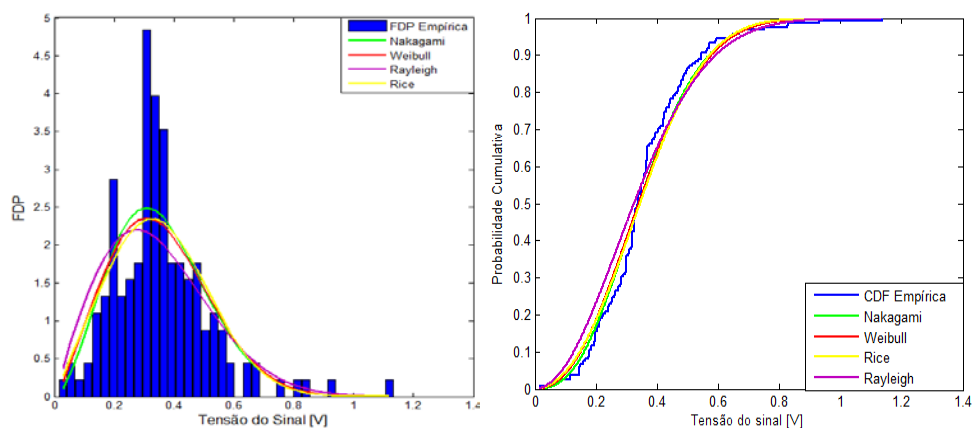


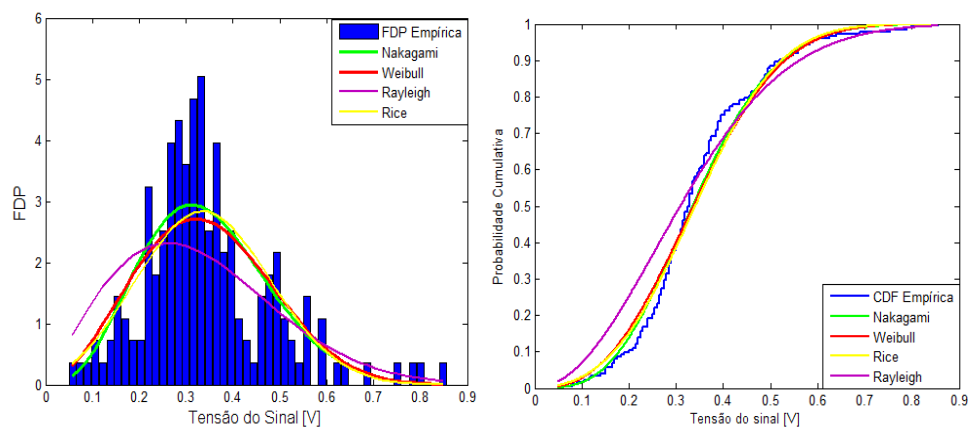
Figura 35: Trecho 1 - Região em linha de visada

Na análise gráfica das figuras 36 e 37 é possível notar que em ambas as frequências, os dados medidos do trecho estudado se aproximam mais de uma distribuição Nakagami.



Trecho 1 - Av. Padre Leonel França e Av. Mario Ribeiro	Visada LOS	Rayleigh (σ)	Rice (s) (σ)		Nakagami (m) (Ω)		Weibull (λ) (α)	
Parâmetros estimados por MLE a partir dos dados empíricos		0,25	0,30	0,14	1,88	0,13	0,38	2,58
Desvio entre as curvas práticas e teóricas de PDF (%)		0,64	0,53		0,49		0,55	
Erro médio Quadrático entre os valores observados e esperados		1,82	1,43		1,34		1,51	
Distribuições que passaram no teste do Qui-Quadrado			X		X			

Figura 36: Trecho 1 em 2,5 GHz



Trecho 1 - Av. Padre Leonel França e Av. Mario Ribeiro	Visada LOS	Rayleigh (σ)	Rice (s) (σ)		Nakagami (m) (Ω)		Weibull (λ) (α)	
Parâmetros estimados por MLE a partir dos dados empíricos		0,26	0,30	0,14	1,74	0,13	0,38	2,62
Desvio entre as curvas práticas e teóricas de PDF (%)		0,72	0,55		0,53		0,56	
Erro médio Quadrático entre os valores observados e esperados		0,89	0,61		0,55		0,63	
Distribuições que passaram no teste do Qui-Quadrado		X	X		X		X	

Figura 37: Trecho 1 em 3,5 GHz

O trecho 2 foi definido como sendo parte da Av. Borges de Medeiros compreendido entre o Jóquei clube e o Colégio da Aplicação da UFRJ.

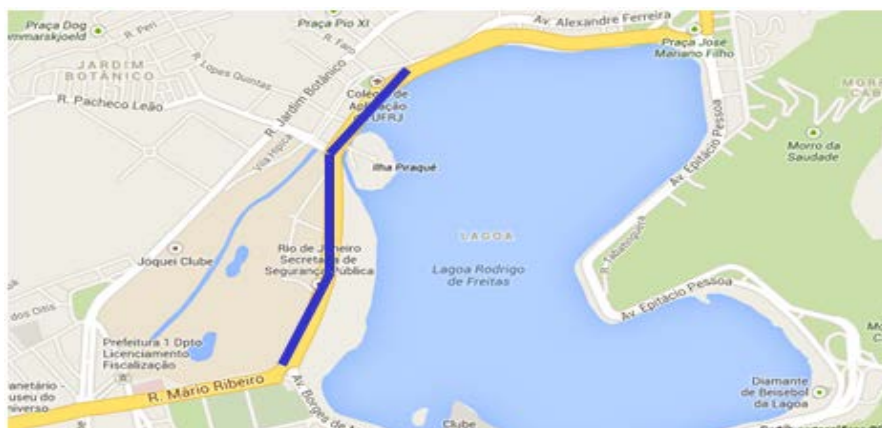
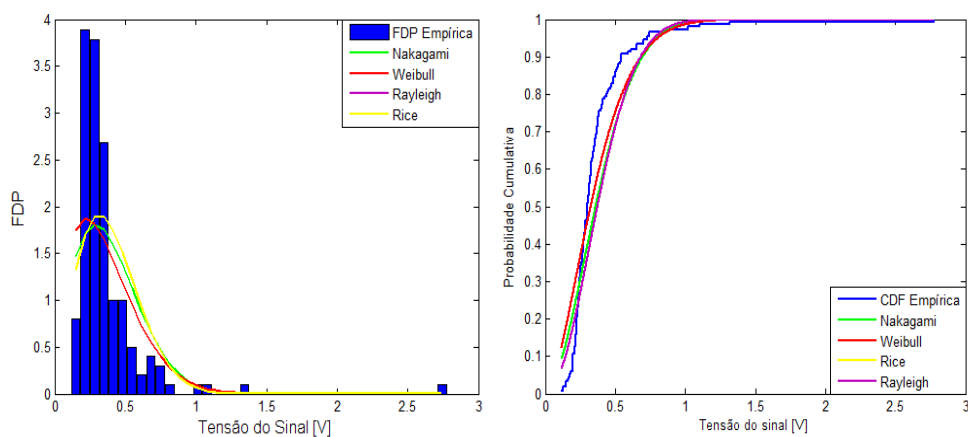


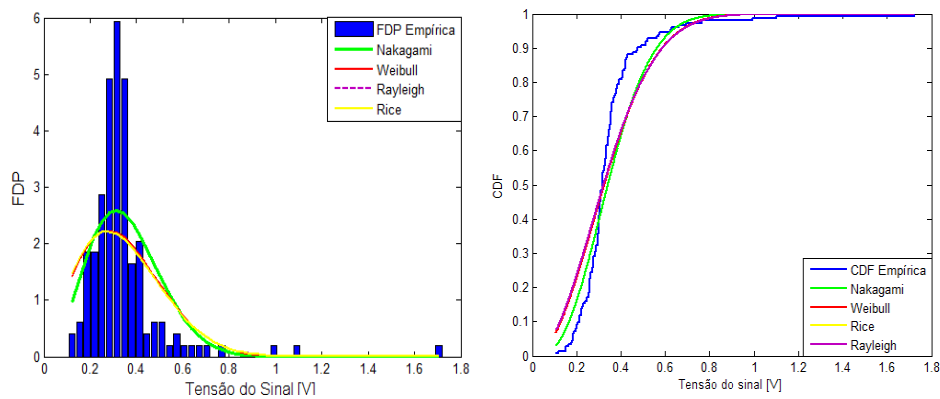
Figura 38: Trecho 2 - Região sem linha de visada

Na análise gráfica das figuras 37 e 38 é possível notar que em 2,5 GHz, os dados medidos, se aproximam mais de uma distribuição Weibull. Em contrapartida, em 3,5 GHz, temos a aproximação de uma distribuição Nakagami.



Trecho 2 - Av. Borges de Medeiros (Jóquei Clube até CA UERJ)	Visada NLOS	Rayleigh (σ)	Rice (s) (σ)		Nakagami (m) (Ω)		Weibull (λ) (α)	
Parâmetros estimados por MLE a partir dos dados empíricos		0,26	0,00	0,26	1,60	0,14	0,38	2,11
Desvio entre as curvas práticas e teóricas de PDF (%)		0,38		0,38		0,37	0,31	
Erro médio Quadrático entre os valores observados e esperados		0,61		0,61		0,57	0,40	
Distribuições que passaram no teste do Qui-Quadrado		X		X		X	X	

Figura 39: Trecho 2 em 2,5 GHz



Trecho 2 - Av.Borges de Medeiros (Jockey Clube até CA UERJ)	Visada NLOS	Rayleigh (σ)	Rice (s) (σ)		Nakagami (m) (Ω)		Weibull (λ) (α)	
Parâmetros estimados por MLE a partir dos dados empíricos		0.27	0.00	0.27	1.43	0.14	0.38	2.04
Desvio entre as curvas práticas e teóricas de PDF (%)		0.39		0.39	0.35		0.38	
Erro médio Quadrático entre os valores observados e esperados		0.73		0.73	0.59		0.72	
Distribuições que passaram no teste do Qui-Quadrado		X		X	X		X	

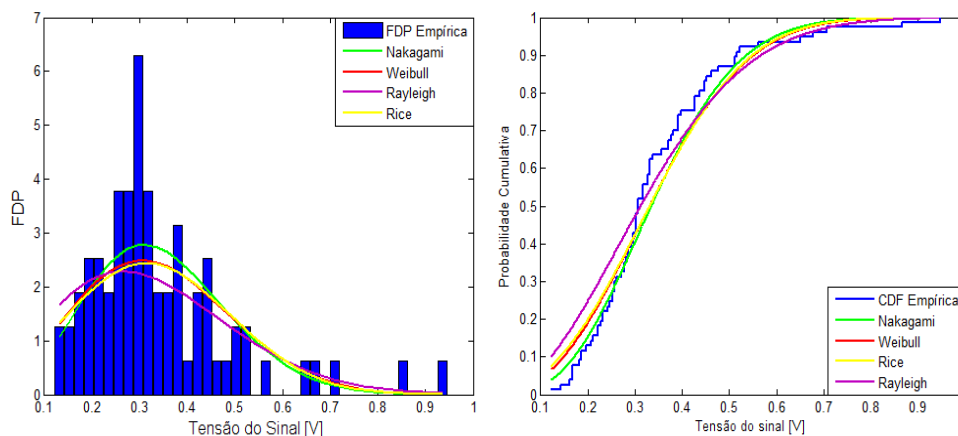
Figura 40: Trecho 2 em 3,5 GHz

O trecho 3 foi definido como sendo parte da Av. Eptácio Pessoa.



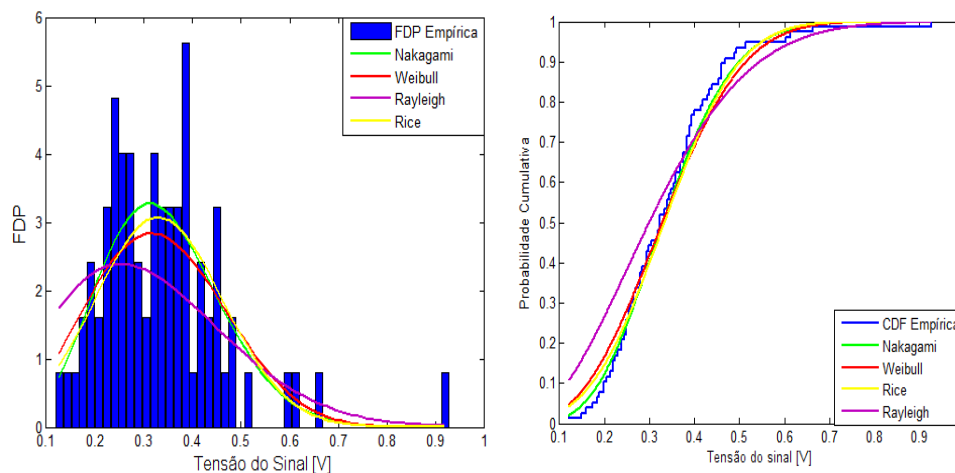
Figura 41: Trecho 3 - Região em linha de visada

Na análise gráfica das figuras 41 e 42, seguindo o mesmo comportamento do trecho 1, é possível notar que em ambas as frequências, os dados medidos se aproximam mais de uma distribuição Nakagami.



Trecho 3 - Av. Epitácio Pessoa	Visada LOS	Rayleigh (σ)	Rice (s) (σ)		Nakagami (m) (Ω)		Weibull (λ) (α)	
Parâmetros estimados por MLE a partir dos dados empíricos		0,25	0,29	0,15	1,85	0,1300	0,38	2,52
Desvio entre as curvas práticas e teóricas de PDF (%)		0,57	0,49		0,45		0,51	
Erro médio Quadrático entre os valores observados e esperados		0,81	0,67		0,56		0,67	
Distribuições que passaram no teste do Qui-Quadrado			X		X		X	

Figura 42: Trecho 3 em 2,5 GHz

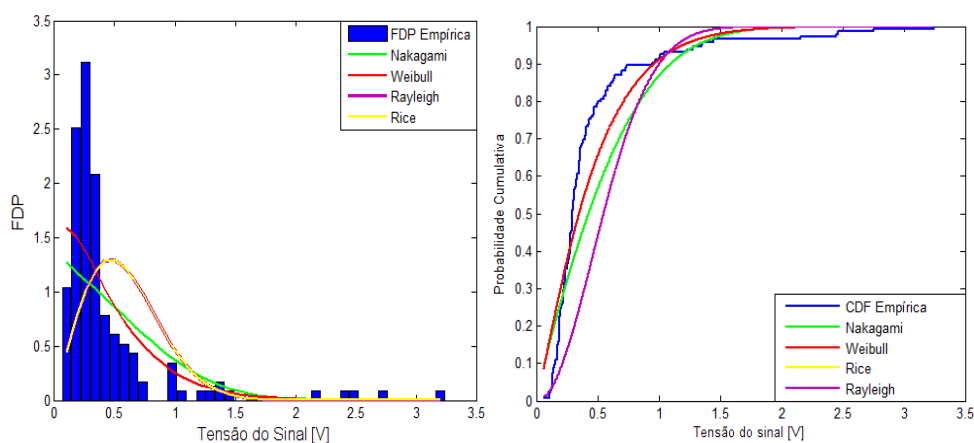


Trecho 3 - Av. Epitácio Pessoa	Visada LOS	Rayleigh (σ)	Rice (s) (σ)		Nakagami (m) (Ω)		Weibull (λ) (α)	
Parâmetros estimados por MLE a partir dos dados empíricos		0,25	0,300	0,13	2,05	0,28	0,37	2,67
Desvio entre as curvas práticas e teóricas de PDF (%)		0,68	0,53		0,5		0,57	
Erro médio Quadrático entre os valores observados e esperados		0,96	0,68		0,62		0,72	
Distribuições que passaram no teste do Qui-Quadrado		X	X		X		X	

Figura 43: Trecho 3 em 3,5 GHz

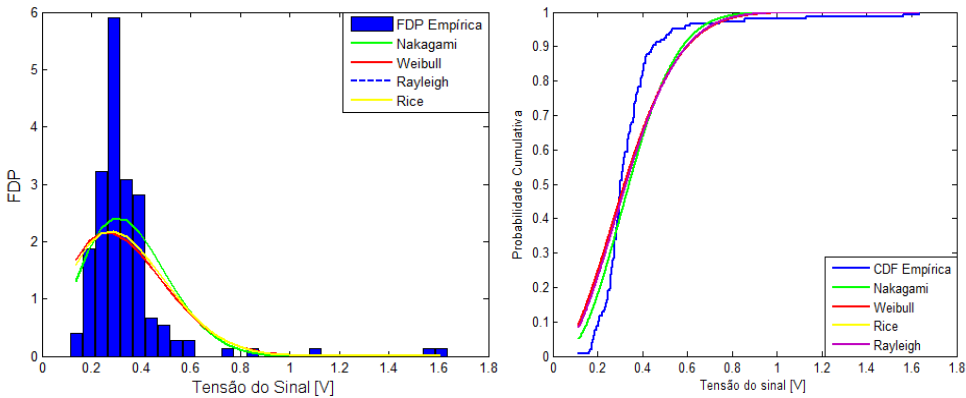
[illegible]

Na análise gráfica das figuras 44 e 45, seguindo o mesmo comportamento do trecho 2, é possível notar que em 2,5 GHz, os dados medidos, se aproximam mais de uma distribuição Weibull. Em contra partida, em 3,5 GHz, temos a aproximação de uma distribuição Nakagami.



Trecho 4 - Av. Delfim Moreira e Av. Bartolomeu Mitre	Visada NLOS	Rayleigh (σ)	Rice (s) (σ)	Nakagami (m) (Ω)	Weibull (λ) (α)
Parâmetros estimados por MLE a partir dos dados empíricos		0,27	0,00 0,27	1,45 0,14	0,38 2,06
Desvio entre as curvas práticas e teóricas de PDF (%)		0,33	0,33	0,32	0,29
Erro médio Quadrático entre os valores observados e esperados		0,41	0,41	0,40	0,30
Distribuições que passaram no teste do Qui-Quadrado		X	X	X	X

Figura 45: Trecho 4 em 2,5 GHz



Trecho 4 - Av. Delfim Moreira e Av. Bartolomeu Mitre	Visada NLOS	Rayleigh (σ)	Rice (s)	Rice (σ)	Nakagami (m)	Nakagami (Ω)	Weibull (λ)	Weibull (α)
Parâmetros estimados por MLE a partir dos dados empíricos		0.27	0.00	0.27	1.27	0.15	0.38	1.91
Desvio entre as curvas práticas e teóricas de PDF (%)		0.42		0.42	0.39		0.43	
Erro médio Quadrático entre os valores observados e esperados		0.7		0.7	0.62		0.72	
Distribuições que passaram no teste do Qui-Quadrado		X		X	X			

Figura 46: Trecho 4 em 3,5 GHz

O trecho 5 foi definido como sendo parte da rua Marquês de São Vicente juntamente com a rua Rubens Berardo.

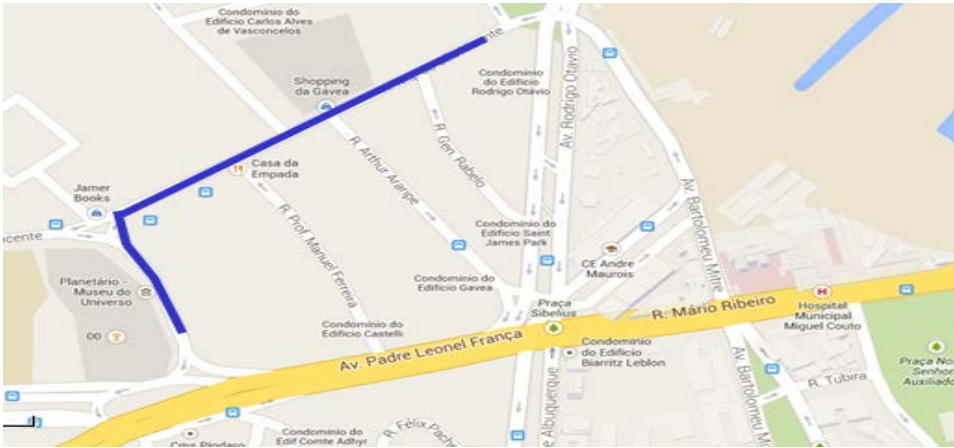
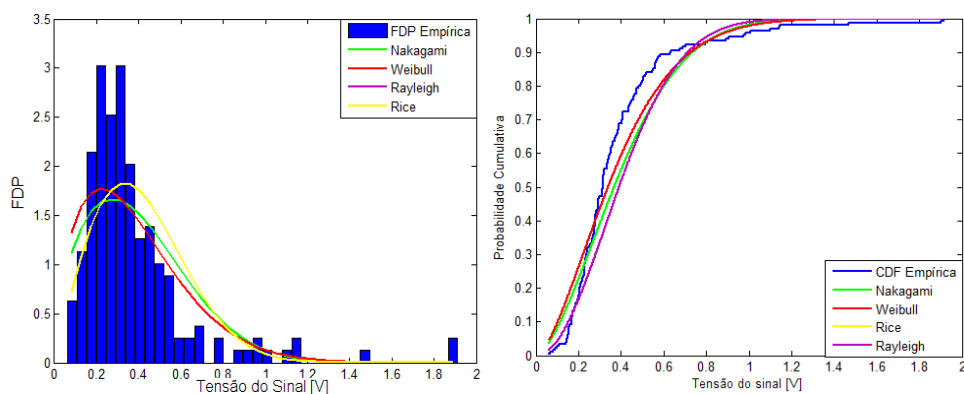


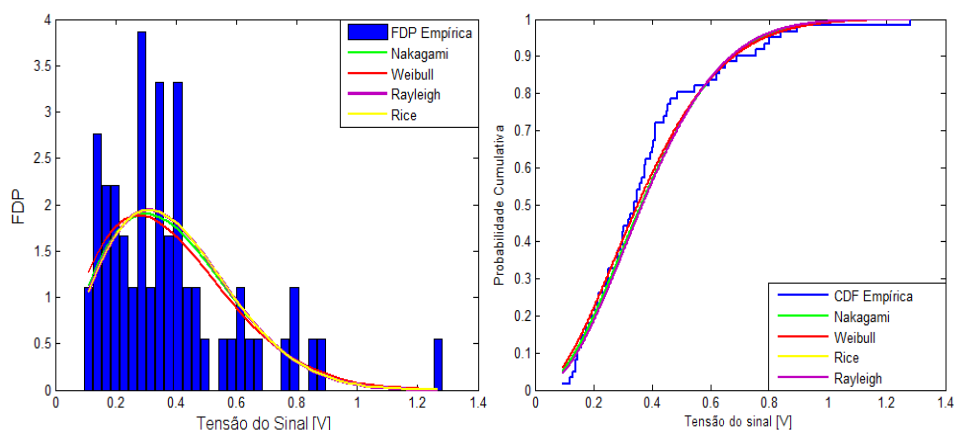
Figura 47: Trecho 5 - Região sem linha de visada

Na análise gráfica das figuras 47 e 48, é possível notar que em ambas as frequências, os dados medidos se aproximam mais de uma distribuição Weibull.



Trecho 5 - Rua Marquês de São Vicente e Rubens Berardo	Visada NLOS	Rayleigh (σ)	Rice (s) (σ)		Nakagami (m) (Ω)		Weibull (λ) (α)	
Parâmetros estimados por MLE a partir dos dados empíricos		0,28	0,00	0,2800	1,17	0,16	0,40	1,97
Desvio entre as curvas práticas e teóricas de PDF (%)		0,32	0,32		0,32		0,31	
Erro médio Quadrático entre os valores observados e esperados		0,38	0,38		0,39		0,36	
Distribuições que passaram no teste do Qui-Quadrado		X	X		X		X	

Figura 48: Trecho 5 em 2,5 GHz



Trecho 5 - Rua Marquês de São Vicente e Rubens Berardo	Visada NLOS	Rayleigh (σ)	Rice (s) (σ)		Nakagami (m) (Ω)		Weibull (λ) (α)	
Parâmetros estimados por MLE a partir dos dados empíricos		0,31	0,00	0,31	0,94	0,1900	0,42	1,8100
Desvio entre as curvas práticas e teóricas de PDF (%)		0,46	0,46		0,45		0,44	
Erro médio Quadrático entre os valores observados e esperados		0,45	0,45		0,44		0,42	
Distribuições que passaram no teste do Qui-Quadrado		X	X		X		X	

Figura 49: Trecho 5 em 3,5 GHz

5

Modelagem da Perda de Propagação

5.1

Comparação com os modelos existentes

Os modelos de propagação possuem limitações e escolha de um determinado modelo depende da sua adequação ao ambiente. A melhor forma de se obter conhecimento na aplicação de um modelo em um certo ambiente é através da realização de medições no ambiente e posterior comparação com os modelos existentes para validação e ajuste. Alguns modelos são mais amplamente aceitos por permitirem adaptação ao ambiente e por serem amplamente testados. A tabela 12 apresenta um resumo comparativo de aplicação dos modelos de propagação, que serão considerados para análise neste trabalho.

Tabela 12: Limites de utilização dos modelos para ambiente externo

Modelo de propagação	Altura da antena da estação base (m)	Altura da antena da estação móvel (m)	Frequência de transmissão (MHz)	Distância (km)
Espaço livre	qualquer	qualquer	qualquer	qualquer
Dois raios para Terra plana	qualquer	qualquer	qualquer	Distância limite para terra plana
Okumura	10 a 100	1 a 10	150 - 1930	1 - 100
Hata-Okumura	30 a 200	1 a 10	150 - 1500	1 - 20
Hata estendido (COST 231)	30 a 200	1 a 10	1500 - 2000	1 - 20
SU/Erceg	10 - 80	2 a 10	< 2700 / 3500	0,1 - 8

Na tabela 13 são fornecidos os modelos considerados com observações a respeito da utilização e classificação do ambiente.

Tabela 13: Descrição dos modelos de propagação para ambiente externo

Modelo de propagação	Observação com respeito à utilização
Espaço livre	Utilizado como referência na comparação com outros modelos, pode ser utilizando quando mais de 60% da 1ª ZF está livre e não existem reflexões consideráveis.
Dois raios para Terra plana	Modelo alterado do espaço livre, no qual é considerada a composição do raio direto com o raio refletido na superfície.
Okumura	Modelo empírico desenvolvido a partir de medições realizadas na cidade de Tóquio no Japão.
Hata-Okumura	Modelo obtido a partir de Okumura. Possui uma tendência de ser otimista em áreas rurais e sobre terreno irregular, sendo mais adequado para cobertura de áreas acima de 1 km.
Hata estendido (COST 231)	Macro células com antena base localizada acima do topo dos telhados.
SUI/Erceg	Descreve três tipos de terrenos: A, B e C: <ul style="list-style-type: none"> • A: terreno montanhoso com vegetação moderada a densa; • B: montanhoso com vegetação rara ou terreno plano com densidade de árvores elevada ou moderada (perda intermediária adequada para ambientes suburbanos); • C: terreno plano ou rural com vegetação leve (apresenta a menor perda).

A região deste estudo é, na sua maior parte semiplana, devido ao fato do bairro da Lagoa e Leblon encontrarem-se ao nível do mar. O bairro da Gávea apresenta pequena elevação do relevo e possui média vegetação.

As figuras a seguir mostram uma comparação dos resultados medidos de perda de potência com tradicionais modelos: Okumura-Hata, COST-231-Hata estendido e SUI, para determinar qual deles apresenta a melhor aderência. Acrescenta-se aos gráficos a curva, em azul, a referência da perda de potência no espaço livre.

5.1.1

Rota Lagoa

Através dos gráficos das figuras 49 e 50 é possível observar, tanto na frequência de 2,5 GHz quanto na de 3,5GHz, que as curvas dos modelos teóricos tendem para uma área suburbana e plana, o que não reflete a realidade da região. Tal fato, pode ser explicado pela existência da lagoa Rodrigo de Freitas que se comporta como um espelho para a reflexão do sinal transmitido.

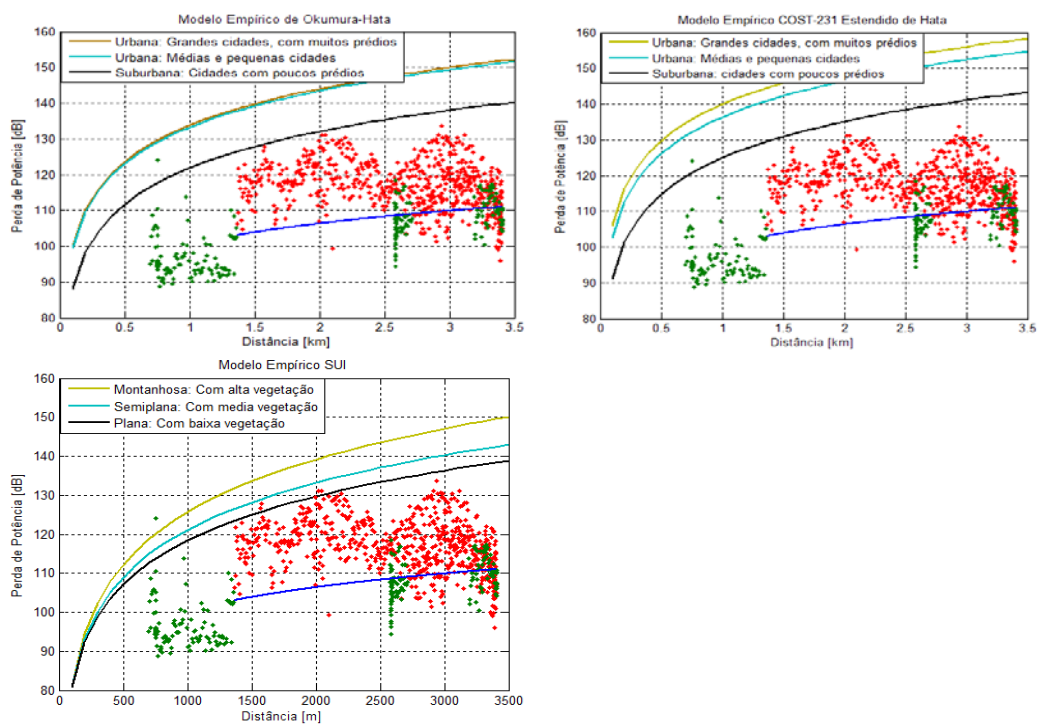


Figura 50: Modelos Empíricos aplicados a rota Lagoa - 2,5 GHz

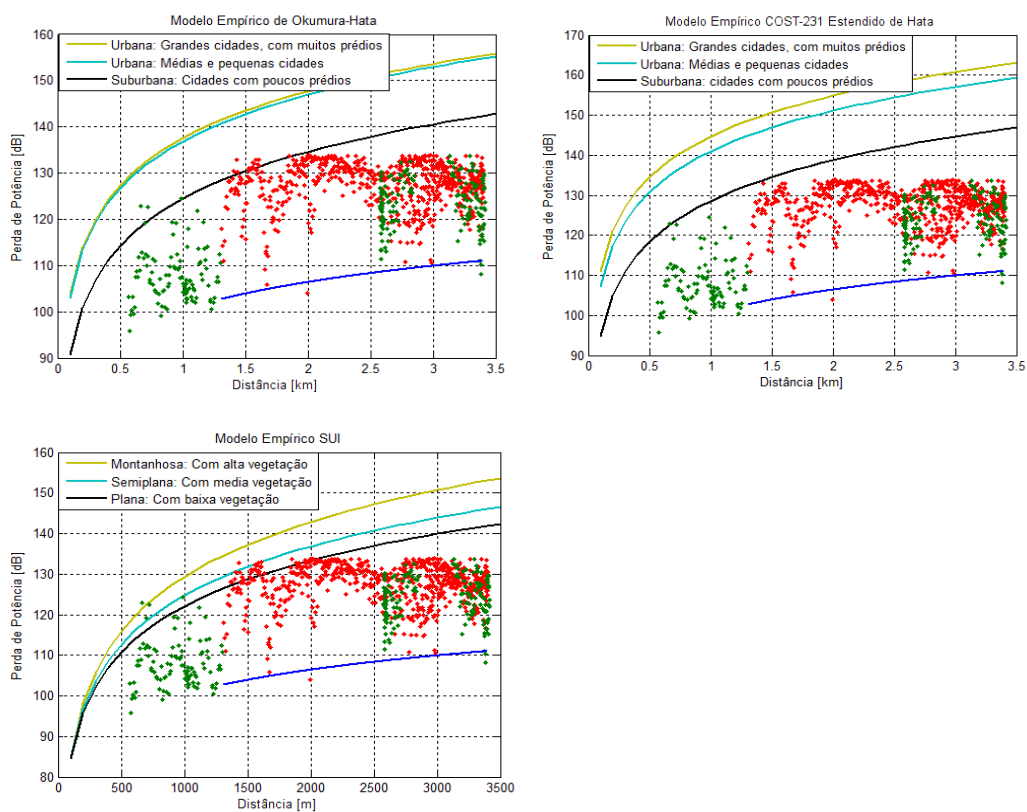


Figura 51: Modelos Empíricos aplicados a rota Lagoa - 3,5 GHz

5.1.2

Rota Leblon

Para a região da rota Leblon é possível observar, nos gráficos das figuras 51 e 52, que as curvas dos modelos teóricos tendem para uma área suburbana, o que não se confirma para a região, e semiplana. Observa-se também que o modelo SUI foi o que apresentou melhor aderência aos dados medidos.

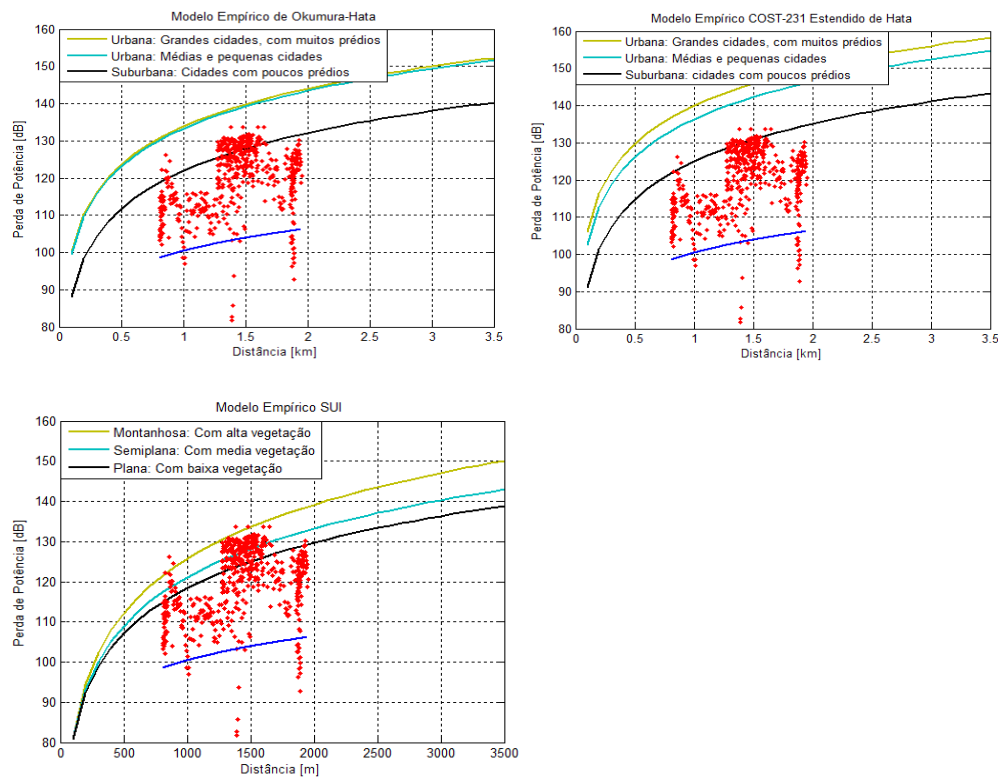


Figura 52: Modelos Empíricos aplicados a rota Leblon - 2,5 GHz

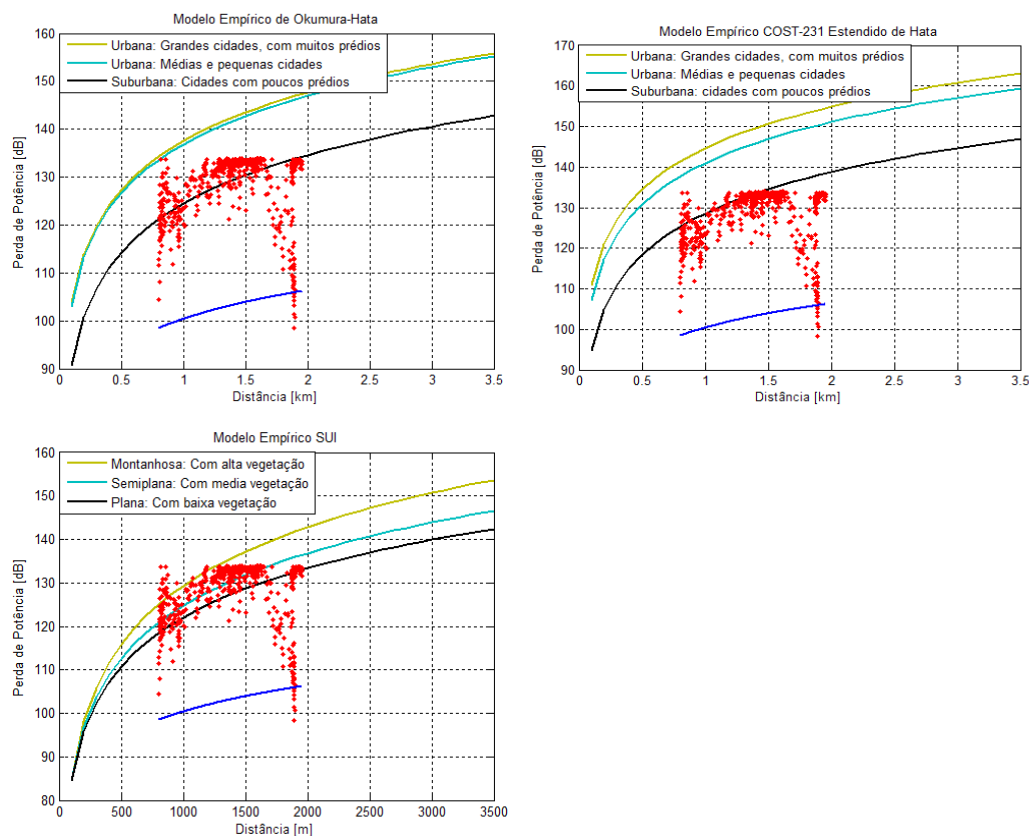


Figura 53: Modelos Empíricos aplicados a rota Leblon - 3,5 GHz

5.1.3

Rota Gávea

Através dos gráficos das figuras 53 e 54 é possível observar, em 2,5 GHz e 3,5GHz, que as curvas dos modelos teóricos tendem para uma área suburbana e semiplana. Observa-se também, uma tendência de conformidade dos dados medidos com os previstos no modelo SUI.

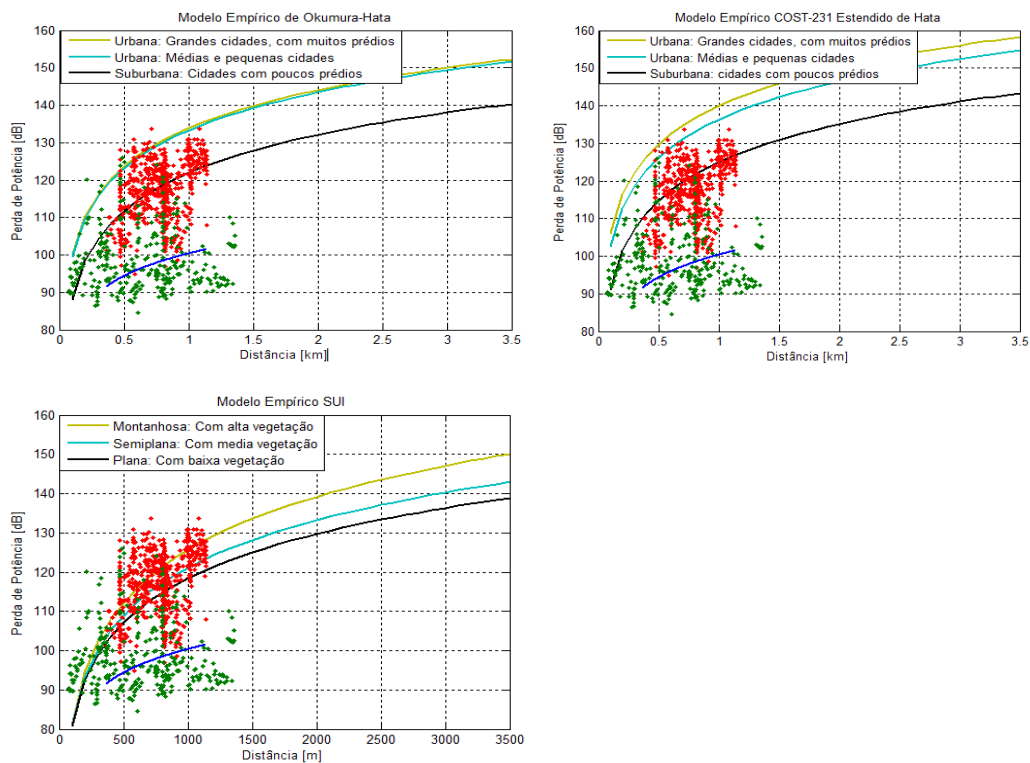


Figura 54: Modelos Empíricos aplicados a rota Gávea - 2,5 GHz

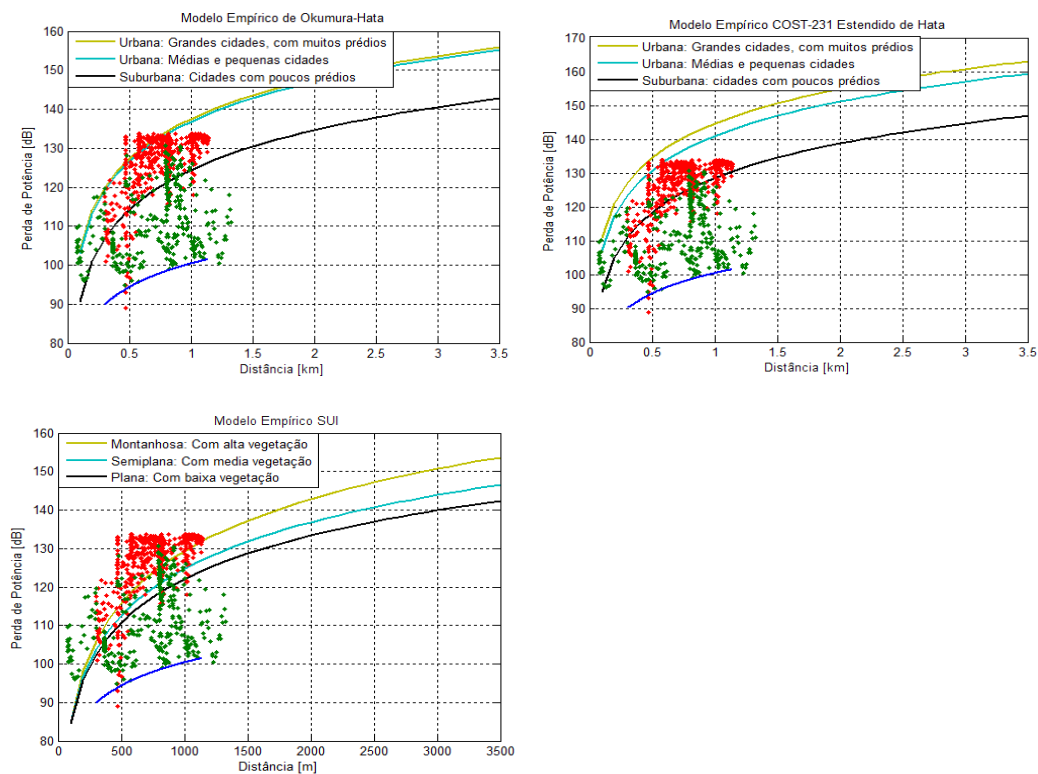


Figura 55: Modelos Empíricos aplicados a rota Gávea - 3,5 GHz

Conclusões

A demanda pelos novos serviços de comunicações em banda larga sem fio caracteriza-se pela alta demanda de recursos, mobilidade, agilidade e a consequente qualidade no serviço prestado. A evolução dos padrões WiMAX e LTE, que são de interesse especial para este trabalho, proporciona acessos em banda larga tanto em áreas rurais quanto em metropolitanas.

As recentes tecnologias de banda larga apresentam características que devem ser analisadas e configuradas de acordo com tipo de cenário onde vão ser implantadas. O planejamento do sistema e a análise dos parâmetros de propagação devem ser feitos com base na predição do valor médio do sinal recebido e na sua variabilidade. Além disso, torna-se necessário estimar a área de cobertura através de modelo de previsão de acordo com as características do ambiente e do tipo de transmissão a ser realizada.

Foi estabelecido como objetivo a ser atingido neste trabalho, a avaliação do comportamento da perda de propagação nas faixas de operação de 2,5 GHz e 3,5 GHz, num cenário urbano mediante a realização de medições experimentais para fins de comparação dos resultados a nível de banda estreita.

O cenário escolhido para a realização das medições foram os bairros da Lagoa, Leblon e Gávea, na cidade do Rio de Janeiro, não só pelas suas características de densidade de prédios e populacional, como também, pela sua potencialidade para consumo, de produtos que necessitem de conexão através de tecnologias sem fio, como WiMAX e LTE.

Os resultados mostraram fatores de atenuação próximos nas duas frequências e dentro do esperado para a característica de cada rota. Sendo assim, é possível classificar as rotas Lagoa e Gávea como regiões tipicamente suburbanas e a rota do Leblon com sendo urbana com sombreamento.

Na análise estatística em larga escala, observou-se, nas duas frequências, uma distribuição tendendo a LogNormal para a condição em linha de visada (LOS) e uma distribuição tendendo a Weibull na condição sem linha de visada (NLOS).

Na análise estatística em pequena escala observou-se, através dos gráficos gerados, que os trechos 1 e 3, mostram um melhor ajuste a distribuição de Rice quando comparado a uma distribuição de Rayleigh, o que caracteriza um ambiente com predominância de visada direta. Em contra partida, os trechos 2, 4 e 5, mostram exatamente o oposto, o que caracteriza um ambiente sem linha de visada. Tal conclusão é ratificada pelos valores dos desvios e erro médio quadrático mostrados nas figuras de cada trecho. As distribuições de Nakagami e Weibull em todos os trechos, se alternaram, como àquelas que tiveram uma maior aderência aos dados empíricos.

Em termos da aplicação de modelos existente, com base na avaliação das medições sob condições LOS e NLOS que foram predominantes nos bairros citados em função da localização da antena transmissora e das rotas de medição traçadas, pôde-se verificar que o modelo SUI foi o que apresentou melhor aderência às curvas de atenuação da potência recebida (dBm) com a distância.

Pelo que foi exposto anteriormente, conclui-se que não existe um modelo de previsão de cobertura único a ser aplicado em um determinado cenário, mas sim a composição de vários modelos que devem ser cuidadosamente escolhidos e testados em função das características das sub-rotas específicas que compõem a rota inteira.

6.1

Sugestões para Trabalhos Futuros

Apresenta-se, como sugestão para trabalhos futuros:

1. Realizar campanhas de medições nas mesmas frequências em regiões suburbanas e rurais e comparar os parâmetros determinados aos obtidos na região urbana estudada.
2. Avaliação de outros modelos de previsão de cobertura que não foram abordados neste trabalho, como os modelos de Walfish-Bertoni e Sakagami-Kuboi, pois ambos costumam apresentar boa resposta na condição sem visada direta e consideram o ângulo de chegada no receptor para determinar a atenuação com a distância;

3. Realização das medições na mesma rota mas com diferentes alturas de transmissão;
4. Realização de medições em banda larga, para fins de caracterização do canal de forma mais abrangente e completa.

Referências bibliográficas

- [1] **M. D. Yacoub**, Foundations of Mobile Radio Engineering, São Paulo, CRC Press, 1993.
- [2] **J. D. Parsons**, The Mobile Radio Propagation Channel, New York: John Wiley & Sons, 1992.
- [3] **Bertoni, H. L.**, “Radio Propagation for Modern Wireless Systems”, Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall PTR, 2000.
- [4] **Sklar, B.**, Digital Communications – Fundamental and Applications, Prentice Hall, 1988.
- [5] **Rappaport, T. S.**, “Wireless Communications - Principles and Practice”: IEEE Press, Inc. New York and Prentice Hall, Inc., New Jersey, 2002.
- [6] **Norton, K.A.** The calculation of Ground-Wave Field Intensity Over a Finitely Conducting Spherical Earth Proc. I.R.E. vol. 29, dezembro, 1998.
- [7] **Hansen, F e Finn, I.** Mobile Fading – Rayleigh and Log-normal Superimposed. IEEE Transactions on Vehicular Tech., Nov. 1977.
- [8] **Sampei, S.** Applications of Digital Wireless Technologies to Global Wireless Communications. New Jersey: Prentice Hall PTR, p.16, 1997.
- [9] **LEE, W.C.Y.**, Mobile Communications Engineering New York: Mc Graw Hill, 1982.
- [10] **Erceg, V.; Greenstein, L.J.**, et al. An empirically based path loss model for wireless channels in suburban environments IEEE Journal on Selected Areas of Communications. Vol. 17, , julho, 1999, pp. 1205–1211.
- [11] **HATA, M.**, Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services IEEE Trans. Veh. Technol. Aug de 1980, Vol. 29, 3, agosto, 1980, pp. 317-325.
- [12] **Okamura, Y.** “Field Strength and its Variability in VHF and UHF Land-Mobile Radio Service.” Rev. Elec. Comm. Lab. No.9-10pp. 825 - 873, 1968.
- [13] **COST-231**, Digital mobile radio towards future generation systems," Final Report - COST Telecom Secretariat - European Comission, 1999.
- [14] **V. Erceg et al.**, \Channel models for fixed wireless applications," IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group, 2001.

- [15] **IEEE 802.16.3c 01/29r4**, \Channel models for fixed wireless applications," IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group <<http://ieee802.org/16>>, 2003.
- [16] **IEEE 802.16**, IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks – Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems, IEEE Std. 802.16 – 2001.
- [17] **RON, C.V.R.** Caracterização do Canal Rádio em Banda Larga na faixa de 3,5GHz em Ambiente Urbano, Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Setembro de 2009.
- [18] **ITU. Telecommunication / ICT statistics** - Mobile cellular subscribers – 2007. Disponível em <http://www.itu.int/ITU-D/ict/eye/Indicators/Indicators.aspx.161>.

8

Apêndice

INFRASTRUCTURE ANTENNAS

Sector Panels

2.3-2.7GHz 60° & 90° Sector Panel
with Null Fill

This WiMAX cross polarized antenna is designed to cover frequencies from 2300 to 2700 MHz. It offers excellent front-to-back ratio of > 32 dB with a VSWR of less than 1.5 in a rugged, off-white UV resistant radome.

Features

- Outstanding port to port isolation of 30 dB typical
- VSWR of less than 1.5
- Null fill
- Great upper side lobe suppression
- Adjustable scissors-style pipe mount bracket with 0-10° downtilt



RF/Electrical Specifications

Model	Frequency Range	Nominal Gain	Azimuth Beamwidth	Elevation Beamwidth
SP2327-18XP60NUF	2300-2500 MHz	17.5 dBi	60° +/- 5°	6°
	2500-2700 MHz	18.0 dBi	60° +/- 5°	6°
SP2327-17XP90NUF	2300-2500 MHz	16.0 dBi	90° +/- 5°	6°
	2500-2700 MHz	16.5 dBi	90° +/- 5°	6°



Mechanical Specifications

Model	Temperature Range	Dimensions (L X W X D)	Weight (Mass)	Wind Survivability
SP2327-18XP60NUF	-40°C to 70°C storage / -40°C to 70°C operating	48" x 6.7" x 3.5" (1232 x 171 x 90 mm)	8.8 lbs (4.0 kg)	125 mph (200 km/h)
	-40°C to 70°C storage / -40°C to 70°C operating	48" x 6.7" x 3.5" (1232 x 171 x 90 mm)	8.8 lbs (4.0 kg)	125 mph (200 km/h)

Technical Data

Polarization:
Linear dual slant +/- 45°
Nominal Impedance:
50 ohms
VSWR:
< 1.5
Front to Back Ratio:
> 32 dB
Port-to-Port Isolation:
30 dB typical
Null Fill:
-15dB
Upper Side Lobe Suppression:
30 degrees above horizon: >-18 dB
Radome Material:
Gray UV resistant plastic
Connector:
Type N female
Mounting Method:
Adjustable pipe mount bracket (included)
Mount Material:
Nickel Zinc Trivalent Plated Steel (RoHS Compliant)

3.5 GHz 15 dBi 120 Degree Vertical Polarized Sector Panel Antenna - Model: HG3515P-120

Applications and Features

- Applications:**
- 3.5 GHz Band Applications
 - Wireless LAN systems
 - IEEE 802.16e Applications
 - WiMAX
 - Mobile WiMAX
 - SOFDMA
 - Wireless Internet Provider "cell" sites

- Features:**
- Superior performance
 - All weather operation
 - Vertical Polarized
 - 20° Down-Tilt Mounting Bracket
 - Includes Mast Mounting Hardware
 - Integral N-Female Connector
 - RoHS Compliant



Description

HyperGain® HG3515P-120 Sector Panel Antenna combines high gain with a wide 120° beam-width. It is a professional quality "cell site" antenna designed primarily for service providers in the 3.5GHz band. Typical applications include IEEE 802.16e, WiMAX and Mobile WiMAX applications.

3.5 GHz sector antenna features a heavy-duty plastic radome for all-weather operation. The heavy-duty mounting system installation adjusts from 0 to 20 degrees downtilt.

It is an ideal choice for Wireless Internet Provider "cell" sites since the cell size can be easily determined by adjusting the downtilt angle. Horizontal coverage is a full 120 degrees.



BROADBAND LOW NOISE AMPLIFIER ABL0800-12-3315

Features:

- Broad band operation from 1.0 GHz to 8.0 GHz
- Low VSWR, unconditional stable
- Small size, low cost
- SMA female connector I/O.
- Single DC power supply, internal voltage regulator, operating voltage from +9~+12V
- Operating temperature -40~+85°C, storage temperature -55~+125°C

Electrical Specifications

Parameters	Units	Specifications		
		Minimum	Typical	Maximum
Frequency Range	GHz	1.0		8.0
Small Signal Gain @25°C	dB	30.0	33.0	36.0
Noise Figure @25°C	dB		1.5	2.0
P-1dB Compression Point	dBm	+13.0	+16.0	
Output IP3	dBm	+22.0	+26.0	
Gain flatness	dB		+/-1.5	+/-2.0
Gain Variation	dB		+/-1.5	
Input VSWR			1.8:1	2.2:1
Output VSWR			1.8:1	2.2:1
Reverse Isolation	dB	45.0	51.0	
Non-Harmonic Spurious	dBc			-60.0
Operating Temperature	°C	-40		+85
Survival Temperature	°C	-55		+125
DC Voltage	V	+8.0		+12.0
DC Supply Current	mA	100 mA	120 mA	140 mA
In/Out connectors		SMA Female		
Size	inches	1.5"x1.0"x0.4"		

1070 Hamilton Road, Suite A, Duarte, CA 91010

Phone: (626) 305-6666, Fax: (626) 602-3101, sales@wenteq.com, www.wenteq.com

Product Specifications

MOBILE MARK COMMUNICATION ANTENNAS



RM-WLF Series



MMF3-700 series



MGRM-WLF Series



Direct N Jack (Female)

700 MHz Surface, Mag-mount & Glass Mount

- Rugged construction
- Wideband RM models operate on 700, GSM, AWS, 2.4 WiFi & 2.6 WiMAX
- Surface and mag-mount models handle up to 35 watts
- Window Mount model installs easily to window with 3M VHB tape

The RM-WLF wideband Series are 3 dBi gain broad-band antennas. A ground plane is recommended for best performance. These antennas will operate over the entire 694-894 MHz spectrum, along with 1.7-2.7 GHz high frequency spectrum. The RM-WLF requires a 5/8" hole (16 mm) for mounting and is outfitted with a gasket for weather sealing. The RM-WLF-DN has been added with a direct N Female connector.

A magnetic mount version is available in MGRM-WLF. This model provides all the same performance as the RM-WLF, with a powerful magnet for less permanent installations.

For glass mounting, Mobile Mark's MMF3-700 antennas provide a no-hole installation. This model has two mounting/transfer plates that attach to the inside/outside. They attach using field proven 3M VHB double sided tape. The short flexible whip on the MMF is fixed in vertical position and never needs to be removed, they are car wash proof.

Model Number	Frequency	Description
RM-WLF-1C-BLK-12	694-894 MHz & 1.7-2.7 GHz	Body Mount
RM-WLF-DN-BLK	694-894 MHz & 1.7-2.7 GHz	Direct N Jack (Female)
MGRM-WLF-1C-BLK-120	694-894 MHz & 1.7-2.7 GHz	Mag Mount
<u>Color options available for above models</u> WHT-White or BLK-Black		
MMF3-700-1C-BLK-180	694-960 MHz	Glass Mount
RM-MK	Optional pipe mounting kit Universal wall/pipe mounting kit	
NT-MK		

Specifications

Frequency:	See above
Gain:	3 dBi peak gain
VSWR:	2:1 max over range
Nominal Impedance:	50 ohms
Maximum Power:	
RM & MGRM	35 Watts
MMF	10 watts
Antenna Size/Mount:	
RM Series	1.75"D x 3"H, 5/8" hole required (45 mm x 76 mm, 16 mm hole)
RM-WLF-DN	1.75"D x 3"H x .63" hole (45 mm x 76 mm, 16 mm hole)
MGRM Mag	2.65" base diameter x 3.62" high (67 mm x 92 mm)
MMF3-700	2" dia. Mount, 3.75"L Whips (51 mm dia, 95 mm)

Case Material:	RM, MGRM: ASA; MM3: ABS
RM Stud Depth:	Mount to 1/2" metal (12.7 mm)
Operating Temp:	-40° to +85° C
Hardware Supplied:	
RM Stud Mount	Locknut and gasket
MMF Glass Mount	3M VHB tape
Cable:	
RM-WLF-1C	1 ft RG-58 (305 mm)
MGRM Mag	10 ft RG-58 (3 meters)
MMF3-700	15ft RG-58 (4.5 meters)
Standard Connector:	SMA Plug (Male)
DN Connector:	Direct N Jack (Female)
Shock & Vibration:	
RM & MGRM	EN 61373, IEEE 1478, MIL 810G TIA-329.2-C
Dust/Water Ingress:	RM:IP67, MGRM:IPx5

US Office & Headquarters: 3900-B River Road, Schiller Park, IL 60176 Tel: 800-648-2800 or 847-671-6690 Fax: 847-671-6715
UK Office: 106 Anglessey Business Park, Hednesford, Staffs. WS12 1NR UK Tel: (+44) 1543-878343 Fax: (+44) 1543-871714
Visit our web page at www.mobilemark.com. Specifications subject to change without notice (1/2012).