UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE TELECOMUNICAÇÕES - PPGEET

ANÁLISE DE COBERTURA E MODELAGEM DO SINAL RÁDIO MÓVEL EM AMBIENTE COM VEGETAÇÃO NA FAIXA 700 - 4000 MHz

DIOGO AUGUSTO BÊTTA MAGALHÃES

Niterói
2020

DIOGO AUGUSTO BÊTTA MAGALHÃES

ANÁLISE DE COBERTURA E MODELAGEM DO SINAL RÁDIOMÓVEL EM AMBIENTE COM VEGETAÇÃO NAFAIXA 700 - 4000 MHz

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações.
Área de concentração: Sistema de Telecomunicações

Orientador:Prof. Dr. Pedro Vladimir Gonzalez Castellanos

Coorientadora: Profª Dra. Leni Joaquim de Matos

Niterói

2020

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE
Gerada com informações fornecidas pelo autor

M188a Magalhães, Diogo Augusto Bêtta
ANÁLISE DE COBERTURA E MODELAGEM DO SINAL RÁDIOMÓVEL EM AMBIENTE COM VEGETAÇÃO NAFAIXA 700 - 4000 MHz / Diogo Augusto Bêtta Magalhães ; Pedro Gonzalez Vladimir Castellanos, orientador ; Leni joaquim De Matos, coorientadora. Niterói, 2020.
103 f. : il.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2020.

DOI: http://dx.doi.org/10.22409/PPGEET.2020.m.10426883705

1. Caracterização. 2. Canal Rádiomóvel. 3. Modelagem. 4. Vegetação. 5. Produção intelectual. I. Castellanos, Pedro Gonzalez Vladimir, orientador. II. De Matos, Leni joaquim, coorientadora. III. Universidade Federal Fluminense. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDD -

Bibliotecária responsável: Fabiana Menezes Santos da Silva - CRB7/5274

DIOGO AUGUSTO BÊTTA MAGALHÃES

ANÁLISE DE COBERTURA E MODELAGEM DO SINAL RÁDIO MÓVEL EM AMBIENTE COM VEGETAÇÃO NA FAIXA 700 - 4000 MHz

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações.
Área de concentração: Sistemas de Telecomunicações

Aprovada em19 de fevereiro de 2020.

Banca Examinadora

_____
Prof Dr. Pedro Vladimir Gonzalez Castellanos - Orientador
Universidade Federal Fluminense - UFF

_____
Profª Dra. Leni Joaquim de Matos – Coorientadora
Universidade Federal Fluminense - UFF

_____
Profª Dr. Maurício Weber Benjó da Silva
Universidade Federal Fluminense - UFF

_____
Prof. Dr. Carlos Vinicio Rodríguez Ron
Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia - INMETRO

Niterói

2020

Dedico este trabalho à minha família, pelo apoio, incentivo e compreensão nos momentos de ausência em que estive me dedicando ao mestrado.

Agradecimentos

A Deus, Justo e bom, por me dar sabedoria e tranquilidade nos momentos difíceis e de aflição, permitindo que concluísse este trabalho com êxito.

À minha esposa Yasmin Magalhães, aos meus filhos, Pedro Magalhães, Davi Magalhães e Noah Magalhães, que sempre estiveram ao meu lado dando força e incentivo nessa minha singradura.

Aos meus sogros, José Plinio e Viviane, pelo apoio incondicional e irrestrito, em especial na fase de conclusão da dissertação.

Ao meu orientador e Prof. Dr. Pedro Vladimir Gonzalez Castellanos, por todo apoio, atenção, e preocupação que teve comigo durante todo o mestrado.

À minha coorientadora e Prof. Drª. Leni Joaquim de Matos, por todos os ensinamentos, experiências, disponibilidade, dedicação, que contribuíram sobremaneira para o meu sucesso.

Aos Professores do curso de Mestrado, por todo conhecimento passado e que tiveram grande valia para elaboração deste trabalho.

Em especial à Diretoria de Comunicações e Tecnologia da Informação da Marinha do Brasil, que me proporcionou a oportunidade de realizar este mestrado.

RESUMO

Na literatura, muitos autores têm caracterizado a perda devido à vegetação, pois esta atenua acentuadamente o sinal rádio móvel, porém os modelos não fornecem valores de predição próximos à realidade brasileira e, em geral, são para vegetação mais densa. No que diz respeito a sistemas de comunicação móvel pessoal, dada a sua utilidade e abrangência, onde o receptor está mudando constantemente as condições de recepção, é de grande importância o estudo em parques urbanos, onde temos um ambiente com vegetação, mas também temos área aberta, fluxo de pedestres e algumas construções de pequeno porte. Ocorre, porém, que existe pouca bibliografia para a modelagem de cobertura nestes ambientes.

Neste trabalho, foi proposta a caracterização do canal de propagação rádio móvel em ambiente com vegetação pouco densa, como objetivo principal. Para tanto, foi montado um sistema de transmissão fixo, com duas alturas para antena transmissora, e um sistema de recepção móvel, montado em cima de um carrinho, com uma única altura da antena receptora, visando uma obtenção de dados em todo ambiente. Além disso, foi feita uma análise dos modelos de predição de cobertura em vegetação, utilizados nos sistemas sem fio, para na faixa de 700 MHz a 4.0 GHz, com a finalidade de propor um modelo para o ambiente em estudo, tendo como referência os modelos *Log-Distance* e Espaço Livre.

Neste contexto, e com o objetivo de fazer uma análise de cobertura do sinal rádio móvel na faixa de 700 - 4000 MHz, este trabalho propõe modelagem do canal para ambiente com vegetação típica de parque urbano, especificamente, na Praça Nilo Peçanha, na cidade de Niterói, Rio de Janeiro.

Palavras – chave: Sinal rádio móvel, Caracterização do Canal, Cobertura e Modelagem de canal.

Abstract

In the literature many authors have characterized the loss due to vegetation, as it strongly attenuates the mobile radio signal, but the models do not provide prediction values close to the Brazilian reality and, in general, they are proposed for more dense vegetation. With regard to personal mobile communication systems, given its usefulness and scope, where the receiver is constantly changing reception conditions, it is of great importance to study in urban parks where there is some vegetation, besides pedestrian flow and some small constructions. It turns out, however, that there is little literature for modeling coverage in these environments.

In this work it is proposed to characterize the mobile radio for that ~~purpose~~, a fixed transmission system was installed, with two heights for the transmitting antenna, and a mobile reception system, mounted on the top of a cart, with a single height of the receiving antenna, aiming at obtaining data in any environment. In addition, an analysis was made of the vegetation cover prediction models used in wireless systems for the range 700 MHz to 4.0 GHz, with the purpose of developing a model for the environment under study, having as reference the models Log-Distance and Free Space.

In this context, and with the objective of analyzing the coverage of the mobile radio signal in the 700-4000 MHz band, this work proposes modeling the channel for an environment with typical vegetation of an urban park, specifically, at Praça Nilo Peçanha, in the city of Niterói , Rio de Janeiro.

Keywords: Mobile radio signal, Characterization, Channel Coverage and Modeling.

Sumário

1. INTRODUÇÃO **13**

1.1. OBJETIVOS 14

1.2. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO 14

2. CANAL DE PROPAGAÇÃO RÁDIO MÓVEL **15**

2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS 15

2.2. MECANISMOS DE PROPAGAÇÃO 16

2.3. ZONAS DE FRESNEL 17

2.4. PROPAGAÇÃO NO ESPAÇO LIVRE 20

2.5. CANAL FAIXA ESTREITA E FAIXA LARGA 21

2.6. VARIABILIDADE (DESVANECIMENTO) DO SINAL 21

2.7. PERDA NO PERCURSO (*Path Loss*) 23

2.8. COMPORTAMENTO ESTATÍSTICO DO SINAL RÁDIO MÓVEL 24

3. MODELOS DE PREDIÇÃO DO SINAL **32**

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS 32

3.2. CATEGORIAS DE MODELOS DE PREDIÇÃO 33

3.3. Modelo *Log-distance* 34

3.4. Modelo ITU-R 34

3.5. ModeloWeissberger 35

3.7. Recomendação ITU-R P. 833-2 35

4. AMBIENTE E *SETUP* DE MEDIÇÕES **37**

4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS 37

4.2. AMBIENTE SONDADO 37

4.3. *SETUP* DE MEDIÇÕES 42

4.4. *SETUP* DE TRAMSMISSÃO 44

4.5. *SETUP* DE RECEPÇÃO 51

5. COLETA EPROCESSAMENTO DE DADOS **55**

6. MODELO PROPOSTO E SUA ANÁLISE **65**

6.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS 65

6.2. DESENVOLVIMENTO DO MODELO 65

7. CONCLUSÕES **80**

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 82

APÊNDICE A - DIAGRAMA DE IRRADIAÇÃO DA ANTENA TRANSMISSORA 84

APÊNDICE B - FUNÇÃO DESNIDADADE DE PROPABILIDADE (*PDF*) PARA A VARIABILIDADADE EM PEQUENA ESCALA NA FREQUENCIA DE 705 MHz NAS ROTAS R1H1, R1H2, R2H1, R2H2 NOS TRECHOS 1 E 2 86

APÊNDICE C - GRÁFICOS DE PERDA X DISTÂNCIA PARA MODELOS TEÓRICOS 90

APÊNDICE D - GRÁFICOS DE PERDA X DISTÂNCIA MODELOS PROPOSTOS 97

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Mecanismos de Propagação.....17
Figura 2.2 - Plano com Orifício.....18
Figura 2.3 - Elipsoides e zonas de Fresnel.....19
Figura 2.4 - Sinal de RF na recepção, submetido a múltiplos fatores de atenuação 22
Figura 2.5 – Sinal RF e suas componentes.....26
Figura 2.6 - Função densidade de probabilidade do tipo Nakagami-m.....31
Figura 4.1 – Vista aérea da Praça Nilo Peçanha.....37
Figura 4.2 – Rota 1.....38
Figura 4.3 – Vista do final da rota 1.....39
Figura 4.4 - Vista do final da rota 2.....40
Figura 4.5 – Início das rotas visto do centro da Praça.....41
Figura 4.6 - Rotas 1 e 2.....41
Figura 4.7 – Antena Transmissora em 1,7 metros.....43
Figura 4.8 – *Setup* de transmissão com altura da antena de 1,7 metros.....44
Figura 4.9 – *Setup* de transmissão com altura da antena de 4,2 metros.....45
Figura 4.10 - Gerador de sinais Anritsu MG3700A.....46
Figura 4.11 - Amplificador de Potência: Mini-circuits ZHL-16W-43+.....47
Figura 4.12 – Antena de Transmissão RFS. 49
Figura 4.13 – Diagrama de Irradiação Horizontal da antena transmissora.....49
Figura 4.14 – Diagrama de Irradiação Vertical da antena transmissora.....50
Figura 4.15 – *Setup* de Recepção. 51
Figura 4.16 - Analisador de Espectro Anritsu MS2692A.....52
Figura 4.17 – Antena de Recepção RFS.....53
Figura 5.1 – Funções densidade de probabilidade para rota 1(T1).....56
Figura 5.2 – Funções densidade de probabilidade para rota 1(T2).....57
Figura 5.3 – Função densidade de probabilidade R1H1F2.....58
Figura 5.4 – Função densidade de probabilidade R1H2F5.....58
Figura 5.5 – Função densidade de probabilidade R2H1F2.....59
Figura 5.6 – Função densidade de probabilidade R2H2F5.....59
Figura 5.7 – Gráfico da Perda calculada e modelos teóricos x Distância-R1H1F1.....61
Figura 5.8 – Gráfico da Perda calculada e modelos teóricos x Distância-R1H2F3.....62
Figura 5.9– Gráfico da Perda calculada e modelos teóricos x Distância-R2H1F2.....63

Figura 5.10 – Gráfico da Perda calculada e modelos teóricos x Distância-R2H2F4.....63
Figura 5.11 – Potencia média X Frequência (em cada Rota/Altura Tx).....64
Figura 5.12 – Gráfico da Perda Média X Frequência (em cada Rota/Altura).....64
Figura 6.1 - Gráfico Perda média x Frequência – T1.....66
Figura 6.2 - Gráfico Perda média x Frequência – T2.....67
Figura 6.3 - Perda Média das duas rotas para cada altura de transmissão no trecho 2.....67
Figura 6.4 - Perda Média das duas rotas para cada altura de transmissão no trecho 1.....68
Figura 6.5 - Perda Média das duas rotas para Htx1 nos dois trechos.....69
Figura 6.6 - Gráfico Perda Média na rota 1 nos dois trechos 70
Figura 6.7 - Gráfico Perda Média no trecho 1 em cada rota.....71
Figura 6.8 - Gráfico Perda Média no trecho 2 em cada rota.....72
Figura 6.9 – Perda x Frequência (L1 e L2).....72
Figura 6.10 – Gráfico Perda x Distância – R1H1F1.....72
Figura 6.11 – Gráfico Perda x Distância – R1H1F5.....73
Figura 6.12 – Gráfico Perda x Distância – R1H2F2.....74
Figura 6.13 – Gráfico Perda x Distância – R1H2F4.....74
Figura 6.14 – Gráfico Perda x Distância – R2H1F2.....75
Figura 6.15 – Gráfico Perda x Distância – R2H1F3.....75
Figura 6.16 – Gráfico Perda x Distância – R2H2F2..... 76
Figura 6.17 – Gráfico Perda x Distância – R2H1F5.....77

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Coeficiente de perda no percurso.....24
Tabela 3.1 - Valores dos Parâmetros do modelo da ITU-R P. 833-2.....36
Tabela 4.1 – Potencia na Saída do Gerador de Sinal.....42
Tabela 4.2 – Lista de equipamentos de Transmissão e Recepção.....43
Tabela 4.3 – Tabela de Ganho do Amplificador de Potência.....47
Tabela 4.4 – Perdas nos Cabos para as portadoras empregadas.....48
Tabela 4.5 – Ganho Real Antena de Transmissão.....50
Tabela 4.6 – Perdas nos Cabos para as portadoras empregadas.....52
Tabela 4.7 - Ganho real da antena de Recepção para Htx = 1,7 metros.....53
Tabela 4.8 - Ganho real da antena de Recepção para Htx = 4,2 metros.....53
Tabela 5.1 - Verossimilhança entre dados e FDP.....58
Tabela 5.1 – Coeficiente de perda "N" nas diferentes composições de rota, altura da antena transmissora e frequência.....60
Tabela 6.1 – Perda Média x Frequência –T1.....67
Tabela 6.2 – Perda Média x Frequência –T2.....67
Tabela 6.3 – Raiz do erro médio quadrático entre perda média experimental e dos modelos, para a Rota 1.....78
Tabela 6.4 – Raiz do erro médio quadrático entre perda média experimental e dos modelos, para a Rota 2.....79

1. INTRODUÇÃO

A comunicação rádio móvel tem experimentado um forte crescimento nas últimas décadas. A explosão global de usuários contribuiu com mais serviços e aplicativos, o que, de fato, exigiu melhores ferramentas de planejamento e cobertura, além de maior largura de banda disponível para acomodar maiores taxas de transmissão de dados. Um aumento tão grande levou ao desenvolvimento apropriado de técnicas de planejamento de rádio, que permitem aos operadores de rede fornecer um bom nível de serviço aos usuários a um custo aceitável [1].

Os projetos de implantação de comunicação móvel são baseados em estudos e estimativas de sua área de cobertura. Na literatura existente, são vários os modelos matemáticos com o objetivo de predizer as perdas de propagação de um sinal em determinados ambientes e considerando diferentes parâmetros.

O estudo do sinal e o planejamento de cobertura de rádio têm um papel ímpar na implantação de redes de comunicação rádio móvel. A propagação de ondas rádio sofre grande influência dos obstáculos presentes no caminho da transmissão, como edifícios, perfil do terreno, vegetação, etc. A vegetação, em geral, é provável que esteja presente no percurso do sinal transmitido, representando uma obstrução significativa, especialmente em ambientes como parques urbanos e estacionamentos a céu aberto, onde as árvores fazem às vezes da proteção do veículo contra o sol, em ruas arborizadas e outros.

Quando o sinal é transmitido, a onda eletromagnética é irradiada pela antena e se propaga no espaço com uma trajetória que depende tanto das características desta onda como do próprio meio em que se propaga. Para prever o nível de sinal na antena receptora, criaram-se diferentes modelos de propagação, que levam em conta diferentes parâmetros, tais como alturas e ganhos das antenas, tipos de obstrução e de terrenos, etc... Além dos parâmetros próprios que caracterizam a onda eletromagnética, tais como frequência e amplitude. Muitos livros e artigos tratam da perda em ambiente com vegetação densa, concentrada, mas pouco se tem sobre o ambiente com vegetação mais rala, pouco densa, encontrada em parques urbanos, estacionamentos e ruas com pouca arborização enfileirada, onde temos área aberta e com algumas árvores. Com isso, quando os modelos existentes para vegetação são aplicados, não apresentam bons resultados.

As frequências de 705, 1790, 2400, 3500 e 4000 MHz que foram utilizadas para este trabalho, são utilizadas para os seguintes serviços: internet móvel 4G, GSM, 3G e, mais recentemente, 4G, 4G (LTE), possível utilização para o 5G, WETC... Devido à importância

dos serviços atribuídos a essas frequências, a busca por modelos eficientes para predizer cobertura de sinal nos mais diversos tipos de canais é de grande valia.

1.1. OBJETIVOS

A caracterização do canal de propagação rádio móvel em ambientes com vegetação pouco densa é o principal objetivo deste trabalho. Além disso, também visa à análise dos modelos de predição de cobertura em vegetação, utilizados nos sistemas sem fio, para na faixa de 700 MHz a 4.0 GHz, com a finalidade de propor um modelo para o ambiente em estudo. O mesmo será derivado de medições feitas na Praça Nilo Peçanha, localizada na Rua Passo da Pátria, S/N, no bairro São Domingos, em Niterói, uma região com árvores próximas, densas, a maioria são de médio e grande porte (altura maior que 5 metros). Neste contexto, os principais objetivos são:

- Montar s*etup* de transmissão e recepção, para realizar as medições no ambiente escolhido;
- Obter uma base de dados robusta de medições faixa estreita na faixa de frequência de 700 MHz a 4,0 GHz;
- Caracterizar um ambiente de propagação com vegetação densa e estudar o comportamento do canal rádio móvel em locais com arborização, sendo parte com clareira (sem vegetação), com trânsito de pedestres e construções no seu entorno;
- Propor um modelo de cobertura, levando em consideração os modelos já existentes para vegetação.

1.2. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

No capítulo 2, serão abordados alguns conceitos de canal rádio móvel e propagação de sinal, detalhando alguns mecanismos de propagação. Também será feita uma abordagem sobre a variabilidade do sinal e perda no percurso (*pathloss).* O capítulo 3 descreverá alguns modelos de predição existentes em canal com vegetação. O capítulo 4 descreverá o ambiente e *setup* de medições. No capítulo 5, será apresentada a coleta de dados e seu processamento, apresentando as curvas obtidas. No capítulo 6 será apresentado todos os passos para criação do modelo proposto e a avaliação. O capítulo 7 trará a análise dos resultados obtidos, comparações entre os modelos existentes e propostos com os dados medidos. O capítulo 8 apresentará as conclusões do trabalho e indicações de trabalhos futuros

2. CANAL DE PROPAGAÇÃO RÁDIO MÓVEL

2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O canal de rádio propagação, pela sua natureza aleatória e dependente da frequência do sinal, necessita de levantamento de dados estatísticos para sua caracterização e para análise de cobertura do sinal.

O desempenho de qualquer sistema de comunicação móvel está ligado ao meio em que o sinal se propaga. Este meio, denominado canal de comunicação, pode ser uma fibra ótica ou um meio de transmissão sem fio. Neste último, o estado do canal pode variar continuamente dentro de um pequeno intervalo de tempo de observação e este comportamento aleatório do canal faz com que a comunicação através dele seja uma tarefa muito difícil [2].

O sinal rádio móvel, ao longo do percurso entre transmissor e receptor, sofre a influência do canal, apresentando variações do nível do sinal recebido devido aos mecanismos de propagação. Desta forma, é extremamente importante estudar as características do ambiente, para que seja possível compreender a influência que o canal exerce sobre o sinal, no caso em estudo nessa dissertação, o canal com vegetação menos densa, típica de parques urbanos, estacionamentos abertos e algumas ruas com arborização.

As condições do canal rádio móvel impõem limitações aos sistemas de comunicações móveis. Por isso, a modelagem do canal através de equações matemáticas, é muito importante para saber sua influência no sinal no percurso trasmissor-receptor.

Durante o trajeto percorrido por uma onda entre o transmissor e recetor, a mesma estará sujeita a diversos fenômenos inerentes à natureza dos mecanismos de propagação. Basicamente, uma onda rádio propagante em um meio pode sofre efeito de reflexão, difração e espalhamento [3].

Para o sistema de comunicações móveis, o modo de propagação mais importante é o de ondas terrestres. Dependendo do ambiente em que se deseja realizar o estudo e a faixa de frequência utilizada, alguns mecanismos de propagação terão maior influência no sinal que chega ao receptor. Os mecanismos e os efeitos mais importantes a que as ondas eletromagnéticas estão sujeitas no ambiente com pouca vegetação serão comentados no item 2.2.

2.2. MECANISMOS DE PROPAGAÇÃO

Ao estudar a cobertura do sinal rádio e para analisá-lo em um canal rádio móvel, devem-se levar em consideração três importantes mecanismos de propagação, descritos a seguir: visada direta, reflexão, difração e espalhamento.

2.2.1. Visada direta

Um enlace está em visada direta quando a reta entre o transmissor e o receptor está livre de obstáculos. A propagação em condição de visada direta é mais comum em ambientes rurais e suburbanos, tendo em vista que a presença de obstáculos é inferior, em quantidade e tamanho, aos ambientes densamente urbanos.

2.2.2. Reflexão

Acontece quando a onda eletromagnética atinge um obstáculo com dimensões bem maiores que o comprimento de onda do sinal que ela propaga, voltando a se propagar no meio de origem.

2.2.3. Espalhamento

Ocorre quando o meio em que a onda se propaga apresenta obstáculos de dimensões pequenas em relação ao comprimento de onda do sinal rádio e o número desses obstáculos é grande (em um determinado volume). Ondas espalhadas são produzidas por superfícies rugosas, pequenos objetos e outras irregularidades do canal.

2.2.4. Difração

É um fenômeno que ocorre com ondas rádio que se propagam em determinado ambiente, e se deparam com algum obstáculo, conseguindo contorná-lo, mudando a direção de sua propagação. Isso é possível, pois os pontos da frente de onda, acima do obstáculo, se comportam como uma nova fonte e continuam irradiando. Através desse mecanismo, é possível que um receptor possa receber uma parcela, às vezes considerável, da energia do sinal transmitido, mesmo diante de uma grande obstrução.

O fenômeno da difração pode ser explicado pelo Princípio de *Huygens*, que estabelece que todos os pontos de uma frente de onda podem ser considerados como fontes que produzirão pequenas ondas secundárias e estas, quando combinadas, resultam em uma nova frente de onda [3].

Devido à combinação dos modos de propagação, o sinal transmitido percorre diversos caminhos de comprimentos diferentes até chegar ao receptor e chegam com diferentes

amplitudes e fases, podendo influenciar de maneira construtiva ou destrutiva. Este fenômeno é chamado de multipercurso. O movimento relativo entre o transmissor e o receptor faz com que os canais de propagação apresentem uma variação temporal e com a distância, gerando desvanecimento do sinal, ou seja, flutuações do sinal em torno do seu valor médio.

Todos os mecanismos apresentados são mostrados da Figura 1.1.

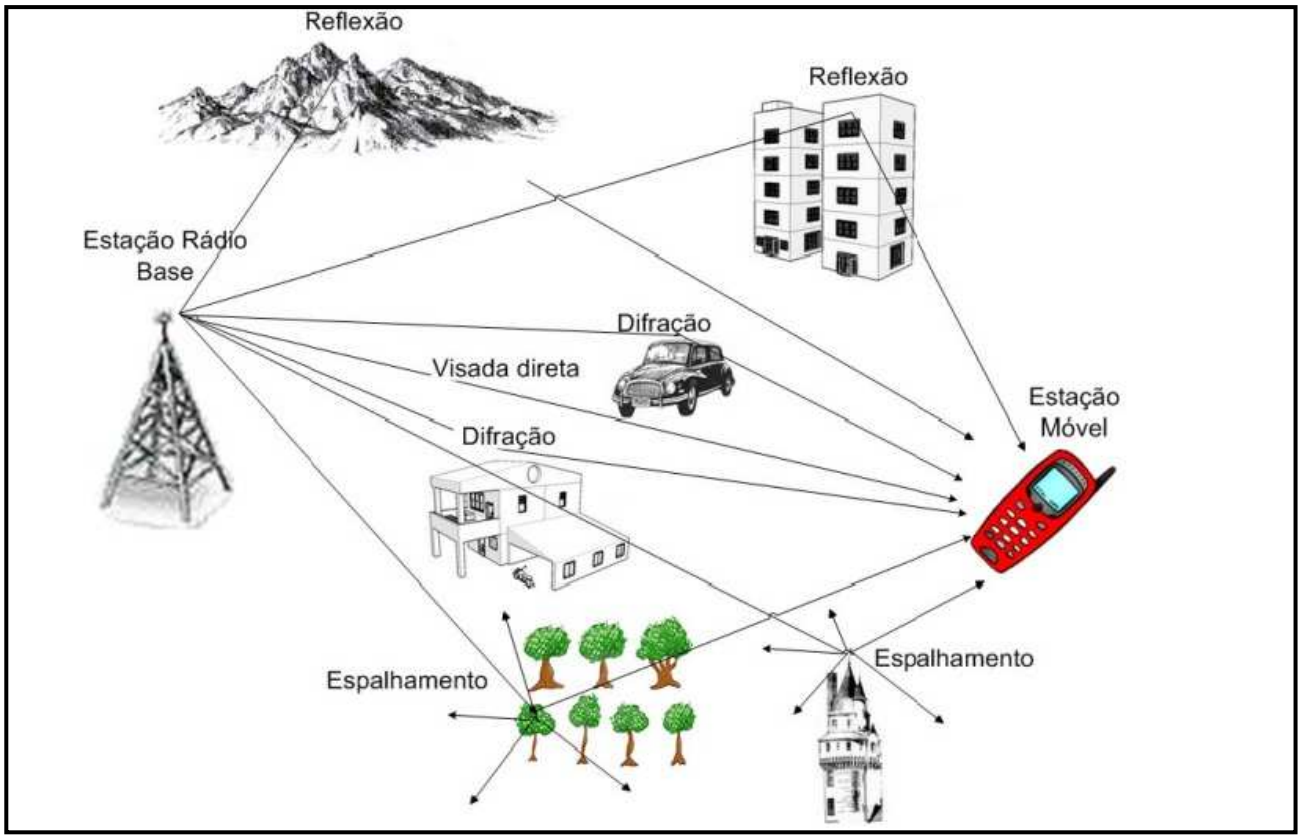


Figura 2.1 - Mecanismos de Propagação.

2.3. ZONAS DE FRESNEL

Em sistemas de comunicação móvel, a condição ideal a ser obtida é o estabelecimento da linha de visada (LOS), sem obstrução, no trajeto percorrido pelo sinal transmitido até um receptor. Esta condição nem sempre pode ser estabelecida ou evitada, pois em diversas situações, a linha de visada se encontra obstruída por prédios, vegetação e elevações de terreno. Esse grau de obstrução pode ser entendido e calculado através da zona de Fresnel [4].

Inicialmente, para modelar o fenômeno, considera-se o transmissor e o receptor no espaço livre, e um plano hipotético perpendicular ao percurso direto, que possui um orifício a uma determinada altura em relação ao raio direto, como se vê na Figura 2.2.

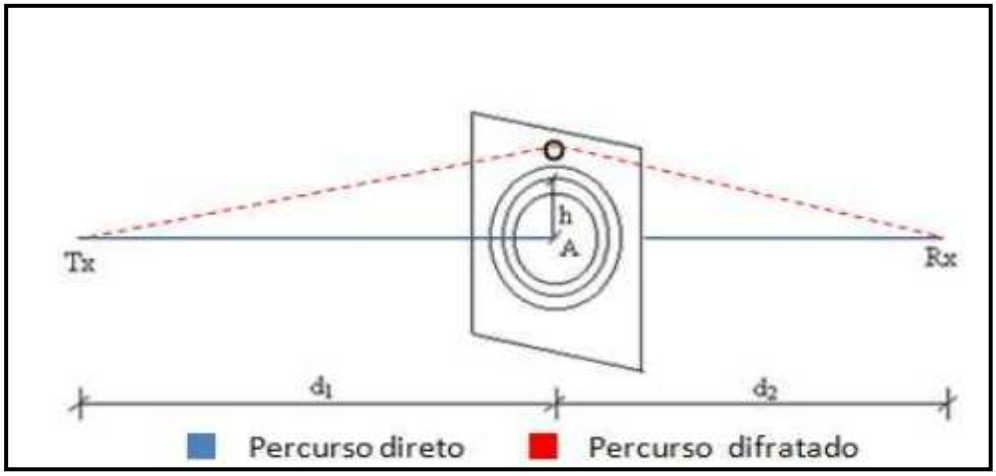


Figura 2.2- Plano com Orifício.

A diferença de percurso entre o que seria o raio direto e o raio difratado pelo orifício, pode ser aproximada por:

$$\Delta L \cong \frac{h^2(d_1 + d_2)}{2d_1 d_2} \tag{2.1}$$

Onde h é a altura do orifício no plano em relação à linha direta entre o transmissor e o receptor ed_1e$d_2$são, respectivamente, as distâncias entre o transmissor e o plano ea distância entre o plano e o receptor.

As zonas de Fresnel, mostradas na Figura 1.3, são as regiões delimitadas por dois elipsoides consecutivos. Sob o ponto de vista prático, o volume definido pelo primeiro elipsoide engloba todos os raios refratados que chegam ao receptor com uma contribuição aditiva ao acoplamento e a segunda zona, que compreende a região entre o primeiro elipsoide e o final do segundo elipsoide, engloba raios difratados que contribuem negativamente ao acoplamento e assim sucessivamente, de forma que raios difratados em zonas de ordem ímpar contribuem positivamente com o raio direto e raios difratados em zonas de ordem par contribuem negativamente com o raio direto. Estas contribuições, obviamente, são motivadas pela diferença de fase entre o raio direto e o raio difratado.

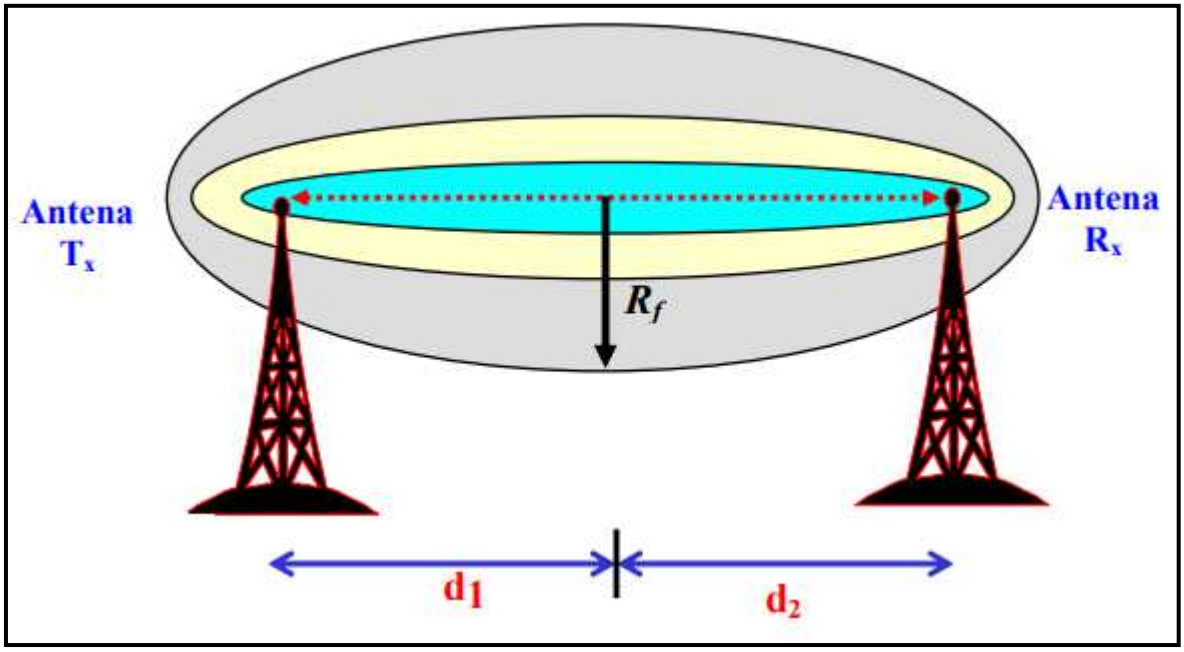


Figura 2.3 - Elipsoides e zonas de Fresnel.

A zona de Fresnel também pode ser definida como uma série de elipses concêntricas em torno da linha de visada, com grande importância para a integridade do *link* (enlace), pois determina uma área em torno da linha de visada que pode introduzir interferência no sinal, caso haja obstrução penetrando dentro da área da primeira elipse. Considera-se que o somatório dessas contribuições, construtivas e destrutivas, não considerando a zona 1, se anulam, ficando somente esta zona como uma contribuição para o nível do sinal recebido.

O raio do elipsoide na *n-ésima*zona de Fresnel é obtido com o uso da equação abaixo:

$$r_n = \sqrt{\frac{n\lambda d_1 d_2}{(d_1 + d_2)}} \tag{2.2}$$

onde são definidos:

d_1- distância entre a antena de transmissão e o centro da elipsoide, em metros;

d_2- distância entre a antena de recepção e o centro da elipsoide, em metros;

λ- comprimento de onda, em metros.

Na primeira zona de Fresnel no dimensionamento de um enlace de rádio, pode ser feito o cálculo de possíveis perdas por difração baseadas no grau de penetração do relevo no

elipsoide da zona de Fresnel, porém, como regra geral, a obstrução máxima permitida é de 40%, mas a obstrução recomendada é de 20% ou menos.

2.4. PROPAGAÇÃO NO ESPAÇO LIVRE

A perda em espaço é livre definida como a perda de propagação de uma onda eletromagnética emitida por uma fonte pontual isolada, no vácuo, sem a presença de qualquer corpo ou meio que afete a onda propagante. Essa é a situação básica e particular de propagação, que corresponde a uma situação idealizada, mas representa uma boa aproximação para a perda observada em enlaces em visibilidade operando em altas frequências e sem efeitos de reflexão no solo, segundo o qual transmissor e receptor estão imersos em um meio livre de obstruções. O mecanismo de propagação envolvido é o de propagação em visibilidade, uma clara linha de visada (*lineofsight- LOS*), sendo seu entendimento e cálculo útil para a compreensão da propagação sem reflexões.

Em projetos de redes banda largos sem fio, por exemplo, pode-se considerar a propagação em espaço livre para a realização de uma estimativa inicial de cobertura do sinal propagado. O cálculo da potência recebida em uma determinada distância é baseado em perdas de propagação no espaço livre e estas podem ser obtidas utilizando-se o modelo de propagação descrito pela equação do espaço livre [3]:

$$P_r(d) = P_t G_t G_r [\frac{\lambda}{4\pi d}]^2 \tag{2.3}$$

Sendo definidos:

$P_r(d)$ - Potência recebida a uma distância *d*, em Watts;

P_t - Potência de transmissão, em Watts;

G_t - Ganho da antena de transmissão;

G_r - Ganho da antena de recepção;

λ - Comprimento de onda, em metros;

d – Distância entre transmissor e receptor, em metros;

A perda no espaço livre ou atenuação sofrida pelo sinal rádio transmitida é determinada pela relação entre a potência transmitida e a recebida, também conhecida por equação de *Friis*:

$$Perda\ no\ espaço\ livre = L = \frac{P_t}{P_r(d)} = G_t G_r [\frac{\lambda}{4\pi d}]^2 \tag{2.4}$$

Para a perda do sinal no espaço livre, em decibéis:

$$\mathrm{L(dB)} = 32{,}44 - 10\log G_t(dB) - 10\log G_r(dB) + 20\log f(MHz) + 20\log d\,(km) \quad (2.5)$$

Considerando antenas isotrópicas, cujo ganho é igual a 1 (um) dB, obtém-se:

$$\mathrm{L(dB)} = 32{,}44 + 20\log f(MHz) + 20\log d\,(km) \quad (2.6)$$

2.5. CANAL FAIXA ESTREITA E FAIXA LARGA

A caracterização experimental do canal rádio móvel pode ser feita em faixa estreita e faixa larga, dependendo dos parâmetros a serem obtidos. Na caracterização faixa estreita, onde somente a portadora é transmitida, é possível analisar a flutuação do nível de sinal recebido, obtendo-se os seguintes parâmetros: a variabilidade rápida (desvanecimento em pequena escala), lenta (desvanecimento em grande escala) do sinal e a perda do no percurso (*pathloss*), provendo a cobertura de sinal na região sondada. Embora no canal faixa estreita o sinal real seja composto por um grupo de frequências, estas são próximas entre si e de largura de faixa pequena, muito menor que a frequência da portadora, por isso somente a frequência da portadora é suficiente para caracterizá-lo.

Na sondagem faixa larga, ao contrário do que se obtém na faixa estreita, é possível extrair tanto as amplitudes como os retardos e as fases dos multipercursos, além dos parâmetros como retardam médio, espalhamento de retardo (*delay spread*), deslocamento e espalhamento Doppler e banda e tempo de coerência, obtidos do processamento dos dados adquiridos das medições.

Neste trabalho, apenas a caracterização faixa estreita será tratada. Para tal, serão apresentados alguns conceitos e definições nos itens seguintes.

2.6. VARIABILIDADE (DESVANECIMENTO) DO SINAL

Os sistemas de comunicações móveis, presentes por todo mundo, normalmente são utilizados em locais que apresentam construções, concentração de pessoas, fluxo de carros e com presença de vegetação. Tendo em vista que a antena do aparelho receptor está em uma altura menor que as obstruções, a maior parte do sinal que nela chega é por espalhamento ou difração.

O canal rádio móvel de propagação de um sinal, tem suas características variando continuamente no tempo, de tal forma que, no destino, o nível do sinal recebido também vária

no tempo, mesmo que a potência do sinal transmitido permaneça constante. Esse comportamento é o que chamamos de variabilidade do sinal, também conhecido por desvanecimento. A variabilidade do sinal se divide em pequena e grande escala, que são descritas a seguir, é de vital importância o uso de ferramentas que possibilitem prever os seus efeitos.

2.6.1. Variabilidade em pequena escala

Também conhecido como desvanecimento de curto prazo ou rápido descreve grandes variações do nível do sinal de radio frequência (RF), que ocorrem em pequenas distâncias (da ordem de poucos comprimentos de onda) ou em pequenos intervalos de tempo, devido à recepção concomitante de diversas versões do sinal de RF transmitido, apresentando amplitudes e fases diferentes. Tais alterações são resultado dos multipercursos do sinal de RF que chegam ao receptor, através dos mecanismos de propagação como reflexão, difração e espalhamento, produzindo o fenômeno da interferência construtiva ou destrutiva. O resultado é que o sinal na recepção é a somatório dos sinais chegando no receptor por muitos caminhos a cada instante de tempo, com amplitudes e fases aleatórias que podem reforçar ou destruir o sinal em um curto intervalo de tempo.A Figura 2.1 mostra os comportamentos da perda de percurso e dos desvanecimentos em pequena escala e grande escala.

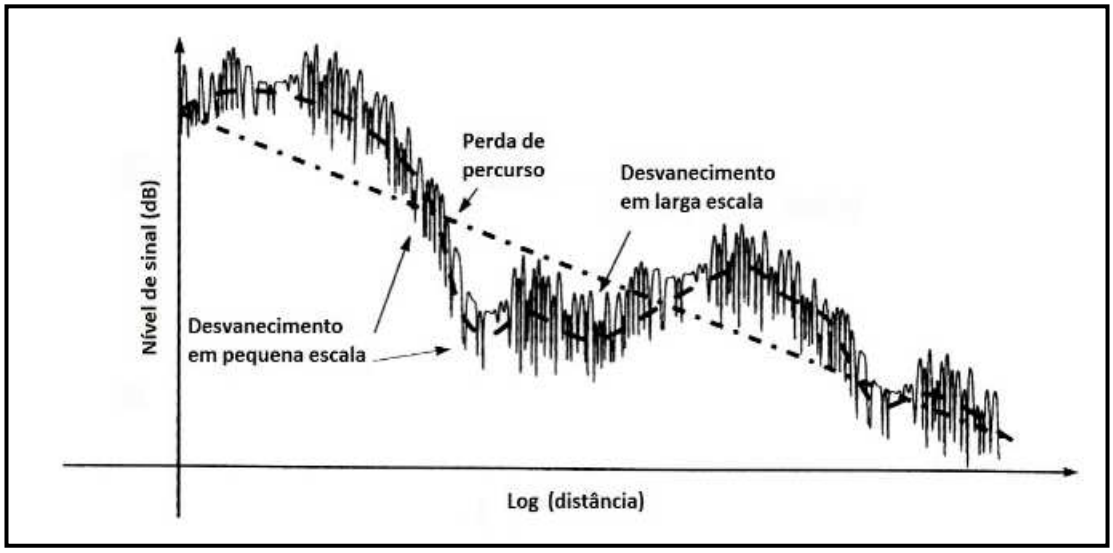


Figura 2.4 - Sinal de RF na recepção, submetido a múltiplos fatores de atenuação [5].

2.6.2. Variabilidade em grande escala

Também conhecido como desvanecimento de longo prazo, lento ou sombreamento, está ligado à atenuação do sinal que chega ao receptor devido ao efeito de degradação do sinal

de RF provocado por obstáculos existentes em seu caminho, representados por prédios, vegetação e pela topografia do terreno, ao longo de grandes distâncias, se comparado ao comprimento de onda do sinal transmitido. A ocorrência de precipitações atmosféricas tais como chuva, granizo e neve, além de oscilações do índice de refração atmosférico que provocam a diminuição do raio efetivo da terra e maximizam obstáculos, também contribuem para o desvanecimento lento. É percebido em distâncias da ordem de dezenas ou centenas de comprimentos de onda.

2.7. PERDA NO PERCURSO (*Path Loss*)

Outra característica importante do canal rádio móvel está relacionada à atenuação média do sinal, ou seja, a intensidade média do sinal em função da distância entre transmissor e receptor. A perda de percurso de um canal de comunicação é definida pela relação entre as potências do sinal transmitido e recebido em decibel [6]. Para a propagação no espaço livre, a potência recebida segue a conhecida lei quadrática de variação da potência recebida com a distância [5] W.C.Y. Lee, *Mobile Cellular Telecommunications Systems*, McGraw-Hill, 1990,obtida a partir da equação de Friis [7] e de observações do modelo de Okumura [8], ou seja:

$$P_r(d) = P_r(d_0) - 10.n.log\left(\frac{d}{d_0}\right) \tag{2.7}$$

Onde n é o coeficiente de perda (atenuação), que varia conforme o ambiente, em geral, variando de 2 a 6,$P_r(d)$ é a potência média recebida a uma distância d qualquer, da antena transmissora, e $P_r(d_0)$ é a potência média recebida a uma distância de referência d_0, próxima ao transmissor, distância fora da região de campo próximo da antena transmissora (igual ou superior à distância de *Fraunhoffer,*a fim de garantir que as medidas da perda de percurso não sejam alteradas pelos efeitos de campo irradiado da região de campo próximo da antena. A Tabela 2.1 representa os valores do coeficiente de perda *n*em vários ambientes.

Tipo de Ambiente	**Valor de *n***
Espaço Livre	2
Área Urbana	2,7 a 3,5
Área Urbana pouco obstruída	3 a 5
Indoor com linha de visada	1,6 a 1,8
Indoor com obstrução	4 a 6

Tabela 2.1 - Coeficiente de perda no percurso.

No canal rádio móvel terrestre, o expoente de perdas no percurso, *n*, é diferente de 2 (entre 2.5 e 6, tipicamente), e seu valor depende das características estruturais da região onde a comunicação se estabelece. Devido à grande variabilidade das estruturas, tipicamente encontradas nesse canal, a uma mesma distância de um transmissor, a potência recebida é variável no tempo.

Quando grandes obstáculos, como edifícios, morros e similares se situam entre transmissor e receptor de um sistema de comunicação móvel, aparece o efeito denominado sombreamento, efeito esse que pode provocar consideráveis "vales" na potência recebida e interromper instantaneamente a comunicação. Medidas comprovam que a variabilidade do sombreamento segue uma distribuição gaussiana em escala logarítmica, ou seja, segue uma distribuição log-normal, conforme já visto. Assim, pode-se reescrever a equação de perdas no percurso de forma a considerar esse novo efeito [9]:

$$P_r(d) = P_r(d_0) - 10.n.log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X\sigma \tag{2.8}$$

Onde *Pr(d)* é a potência média recebida em um ponto qualquer, a uma distância *d* da antena transmissora, e $X\sigma$ é uma variável aleatória com distribuição log-normal (em dB), que representa quanto o sombreamento está variando em torno do valor médio da potência recebida, sendo representada pelo desvio padrão desta variável. Esse desvio padrão se situa, normalmente, na faixa de 7 a 15 dB. Vale observar que o valor da potência $P_r(d)$ não considera as variações causadas pelos multipercursos.

2.8. COMPORTAMENTO ESTATÍSTICO DO SINAL RÁDIO MÓVEL

Ao longo do tempo e com diversas experiências, sabe-se que somente com o valor médio no nível do sinal que chega ao receptor não é suficiente para se caractrerizar um canal rádio móvel nem avaliar seu desempenho, sendo de vital importância o estudo da variabilidade do sinal em torno do seu valor médio, visando obter mais parâmetros e fazer um estudo mais profundo da análise e cobertura do sinal, sendo possível estudar o comportamento do sinal e o efeito que o meio exerce sobre ele [10,11].

Inúmeros fatores envolvem a propagação da onda eletromagnética no percurso entre o transmissor e o receptor. Esses fatores não obedecem a leis determinísticas, uma vez que essas influências, de diferentes fenômenos, têm caráter aleatório devido à mobilidade,

principalmente.

A taxa de variação nos níveis de sinal em um canal de radiocomunicação é consequência de múltiplos percursos e, no caso de sistemas móveis, também está associada ao movimento relativo do receptor. A variabilidade do sinal recebido, quando não ocorre visada, muitas vezes pode ser descrita pela f.d.p. (função densidade de probabilidade) *Rayleigh*, típica de ambientes onde o receptor só recebe multipercursos do sinal transmitido. Caso existam, além dos multipercursos, uma componente de visada como ocorre, por exemplo, na visada direta, o desvanecimento segue muitas vezes, a função de distribuição de Rice [12,13].

2.8.1. Distribuição estatistica associada ao desvanecimento em grande escala (*fading lento*)

Essa variabilidade do sinal, em geral, tem uma distribuição lognormal associada a ela. A distribuição lognormal caracteriza a envoltória (sombreamento) do sinal recebido em regiões de sombra causadas por obstruções como montanhas, carros, árvores e construções, por exemplo. Com isso, ocorre uma queda aleatória na potência recebida que também diminui lentamente com o movimento do receptor, em relação ao transmissor, como mostra a Figura 5.

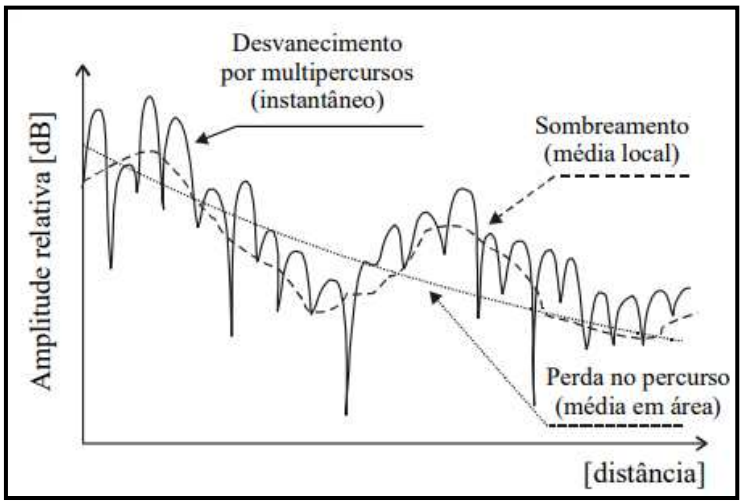


Figura 2.5 – Sinal RF e suas componentes.

Cada obstáculo atenua o sinal de uma maneira e a potência do sinal recebida final é a soma dos fatores de transmissão de todos os objetos. Como uma consequência, o logaritmo do sinal recebido compara a soma de um número grande de fatores de transmissão, cada qual sendo expresso em decibéis. Com o número de fatores elevado, o teorema do Limite Central diz que a distribuição da soma se aproxima de uma Gaussiana.

O sinal obstruído chega ao receptor basicamente através de difração e espalhamento, e a amplitude do sinal, assim recebido, segue uma função densidade de probabilidade (fdp) Normal (ou lognormal, se a média e o desvio são tomados em dB), ou gaussiana.

Assim, pode-se modelar o sombreamento como uma incerteza em torno do valor nominal (médio), obtido a partir da perda de percurso (*path loss*), como sendo uma variável aleatória gaussiana, medida em dB, e que tem média nula e desvio padrão entre $5 \leq \sigma_{dB} \leq 12$. Desta forma, pode-se escrever para a f.d.p. da flutuação de potência em dB (g):

$$p(g) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{dB}} \exp\left[-\frac{(g - m_{dB})^2}{2\sigma_{dB}^2} \right] \tag{2.9}$$

onde m_{dB} e σ_{dB} são, respectivamente, a média e o desvio padrão da lognormal.

Para poder compreender melhor esse tipo de desvanecimento, necessitamos estudar a atenuação de sinal sofrida com a distância. Em um ambiente rádio móvel, assim como em qualquer ambiente de comunicação via rádio, a intensidade ou nível do sinal recebido diminui conforme o receptor se afasta do transmissor. Muitos modelos de predição da atenuação com a distância (*Path LossModels*) são encontrados. Todos eles, sejam empíricos ou analíticos, indicam que a potência média do sinal recebido decai de forma logarítmica com a distância, seja em ambientes internos (*indoor)* ou externos (*outdoor*).

2.8.2. Distribuição estatistica associada ao desvanecimento em pequena escala

Uma das principais características do desvanecimento em pequena escala é o fenômeno dos múltiplos percursos que se caracteriza pela soma vetorial de diversas amostras do mesmo sinal no receptor com diferentes amplitudes, fases e atrasos, devido a terem percorrido diferentes caminhos entre o transmissor e receptor, em pequeno espaço de tempo. Além disso, apresenta um comportamento estatístico que, em geral, é representado por uma f.d.p. do tipo *Rayleigh*, *Rice* ou *Nakagami-m*. As distribuições *Rayleigh* e *Rice* correspondem ao modelo físico que assume a existência de um número suficientemente grande de componentes de multipercursos, com diferentes fases. Caso essas componentes apresentem potências próximas, o canal é caracterizado com a f.d.p. *Rayleigh*. Contudo, se uma das componentes tiver potência muito maior que as demais, caracterizando visada (LOS), tem-se a distribuição Rice. A distribuição *Nakagami-m* também pode caracterizar tal variabilidade do sinal em canais de comunicação móvel, sendo mais genérica que as outras, que são casos particulares da mesma. Tais distribuições estatísticas são apresentadas a seguir.

2.8.2.1. Distribuição Rayleigh

Considerando um sinal portador s, de frequência ω_0, e com uma amplitude a, escrita na forma exponencial:

$$s = a\exp(j\omega_0 t) \tag{2.10}$$

Seja a_i e θ_i a amplitude e a fase da i-*ésima* onda espalhada, respectivamente. O sinal resultante s_r no receptor móvel é a soma de n ondas espalhadas:

$$S_r = \sum_{i=1}^{n} a_i \exp[j(\omega_0 t + \theta_i)] = \sum_{i=1}^{n} a_i \exp(j\theta_i)\exp[j(\omega_0 t)] = [r\exp(j\theta)]\exp[j(\omega_0 t)] \tag{2.11}$$

$$S_r = r\exp[\ j(w_0 t + \theta)] \tag{2.12}$$

$$r\exp(j\theta) = \sum_{i=1}^{n} a_i \exp(j\theta_i) = \sum_{i=1}^{n} a_i \cos\theta_i + j\sum_{i=1}^{n} a_i \sin\theta_i \overset{\Delta}{=} x + jy \tag{2.13}$$

onde x e y são ditas componentes em quadratura.

então: $$x \overset{\Delta}{=} \sum_{i=1}^{n} a_i \cos\theta_i \ \text{ e } \ y \overset{\Delta}{=} \sum_{i=1}^{n} a_i \sin\theta_i$$

onde:
$$\begin{cases} r^2 = x^2 + y^2, \text{ onde } r \text{ é a envoltória} & (2.14) \\ x = r\cos\theta & (2.15) \\ y = r\sin\theta & (2.16) \end{cases}$$

Considerando que:

- n é usualmente muito grande,
- as amplitudes individuais a_i são aleatórias, e
- a fase θ_i tem uma distribuição uniforme.

Pode-se dizer, usando o teorema de Limite Central, que x e y são ambas variáveis gaussianas, com média igual a zero e variâncias $\sigma_x^2 = \sigma_y^2 \overset{\Delta}{=} \sigma_r^2$, portanto, suas distribuições são do tipo:

$$p(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z}\exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right) \tag{2.17}$$

onde z substitui x ou y.

Se x e y são variáveis aleatórias independentes, gaussianas e com o mesmo desvio padrão, a distribuição de probabilidade conjunta $p(x, y)$ é:

$$p(x, y) = p(x)p(y) = \frac{1}{2\pi\sigma_r^2}\exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma_r^2}\right) \tag{2.18}$$

A distribuição $p(r, \theta)$ pode ser escrita como função de $p(x, y)$ a seguir:

$$p(r, \theta) = |J| p(x, y) \tag{2.19}$$

onde

$$J \stackrel{\Delta}{=} \begin{vmatrix} \partial x/\partial r & \partial x/\partial \theta \\ \partial y/\partial r & \partial y/\partial \theta \end{vmatrix} \tag{2.20}$$

É o Jacobiano da transformação das variáveis x, y em r, θ. Usando as equações (2.15) e (2.16), obtém-se $J = r$. Então, substituindo (2.18) e (2.20) em (2.19), tem-se:

$$p(r, \theta) = \frac{r}{2\pi\sigma_r^2}\exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_r^2}\right) \tag{2.21}$$

A densidade $p(r)$ é obtida pela média de $p(r, \theta)$, na faixa de variação de θ:

$$p(r) = \int_0^{2\pi} p(r, \theta) d\theta \tag{2.22}$$

$$p(r) = \begin{cases} \dfrac{r}{\sigma_r^2}\exp\left(-\dfrac{r^2}{2\sigma_r^2}\right), \forall r \geq 0 \\ \\ 0, \forall r \leq 0 \end{cases} \tag{2.23}$$

Em que r é a envoltória do sinal e σ_r^2 é a variância das componentes em fase e em quadratura, que compõem o sinal r.

Em um ambiente de propagação *Rayleigh*, o sinal recebido é composto, exclusivamente, de ondas refletidas, com amplitudes equivalentes, portanto, não existe uma onda com energia muito superior às outras ondas, chegando ao receptor. Isto é o que ocorre, por exemplo, em uma situação na qual não exista linha de visada direta entre transmissão e recepção. Assim, a f.d.p. *Rayleigh* normalmente se ajusta à variabilidade rápida do sinal nos

sistemas móveis, onde não existe visada entre transmissor e receptor, sendo mais simples de se trabalhar, já que é função apenas da variável σ_r.

2.8.2.2. Distribuição Rice

A distribuição Rice descreve a variação, em pequena escala, da envoltória do sinal recebido, em um ambiente de propagação com múltiplos percursos, onde existe uma linha de visada direta entre o transmissor e o receptor. Neste caso, o sinal recebido S_r é:

$$S_r = \overbrace{r\exp(j\omega_0 t + \theta)}^{onda-espalhada(eq.3)} + \overbrace{a\exp(j\omega_0 t)}^{onda-direta} \tag{2.24}$$

Ou, equivalentemente, substituindo a eq.(2.13):

$$S_r = [(x + a) + jy]\exp(j\omega_0 t) \tag{2.25}$$

Observar que, neste caso, x é substituído por $x + a$.

$$\begin{cases} r^2 = (x + a)^2 + y^2 & (2.26) \\ x + a = r\cos\theta & (2.27) \\ y = r\sin\theta & (2.28) \end{cases}$$

Após algum desenvolvimento [*Yacoub*], chega-se à PDF de r, empregando as eq.(2.19), (2.20) e (2.22):

$$p(r,\theta) = \frac{r}{2\pi\sigma_r^2}\exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_r^2}\right) \tag{2.29}$$

$$I_0(x) = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi}\exp(x\cos\theta)d\theta \tag{2.30}$$

é a função de Bessel modificada, de ordem zero. Observa-se que, se $a = 0$ em (2.29) a distribuição Rice se torna uma distribuição Rayleigh.

Observa-se que a distribuição Rice trabalha, usualmente, com um parâmetro K, chamado de fator de Rice, definido como: $K= a^2/(2.\sigma^2)$ou, em dB: $K_{dB}= 10\ log[a^2/(2.\sigma^2)]$. À medida que o fator de Rice tende para zero, a distribuição Rice tende a uma distribuição

Rayleigh. Por outro lado, caso o parâmetro K seja muito maior que 1 ($K>>1$), a distribuição Rice tende a uma distribuição gaussiana.

2.8.2.3. Distribuição Nakagami-m

A distribuição *Nakagami-m*, assim como a distribuição Rayleigh, também é utilizada para descrever as flutuações dois sinais provenientes de canais com desvanecimento. Contudo, sua representação é mais ampla e pode modelar desvanecimentos mais severos, como os observados por *Nakagami*, em medidas realizadas em HF (HF- *High Frequency*), em um canal ionosférico. A f.d.p. para essa distribuição é dada por:

$$p(r) = \frac{2}{\Gamma(m)}\left(\frac{m}{\Omega}\right)^m r^{2m-1} e^{-mr^2/\Omega} \tag{2.31}$$

onde Ω é definido como:

$$\Omega = E\left(r^2\right) \tag{2.32}$$

e $\Gamma(.)$ é a função Gamma, definida como:

$$\Gamma(m) = \int_0^\infty x^{m-1} e^{-x} dx \tag{2.33}$$

e o parâmetro m é definido como a razão dos momentos, chamado fator de desvanecimento (*fading*), expresso por:

$$m = \frac{\Omega^2}{E[(r^2 - \Omega)^2]} \quad , \qquad m \geq \frac{1}{2} \tag{2.34}$$

ou seja, o inverso da variância normalizada de r^2. Em contraste com a distribuição Rayleigh, que possui um único parâmetro, que pode ser usado para ajustar a estatística ao desvanecimento do canal, a distribuição de *Nakagami-*m possui dois parâmetros: m e Ω. Como consequência, essa distribuição permite maior flexibilidade e precisão na modelagem do canal, mas que nem sempre compensa ser usada, já que quanto mais parâmetros são empregados, mais trabalho e tempo são necessários. A Figura 2.6 mostra diversas curvas para diferentes valores de *m*. Observa-se que para $1/2 \leq m < 1$, esta f.d.p. representa um canal com multipercursos não muito fortes. Observa-se, na Figura 2.6,que para m = 1 a fd.p. Nakagami recai na Rayleigh e, para m >> 1, na gaussiana.

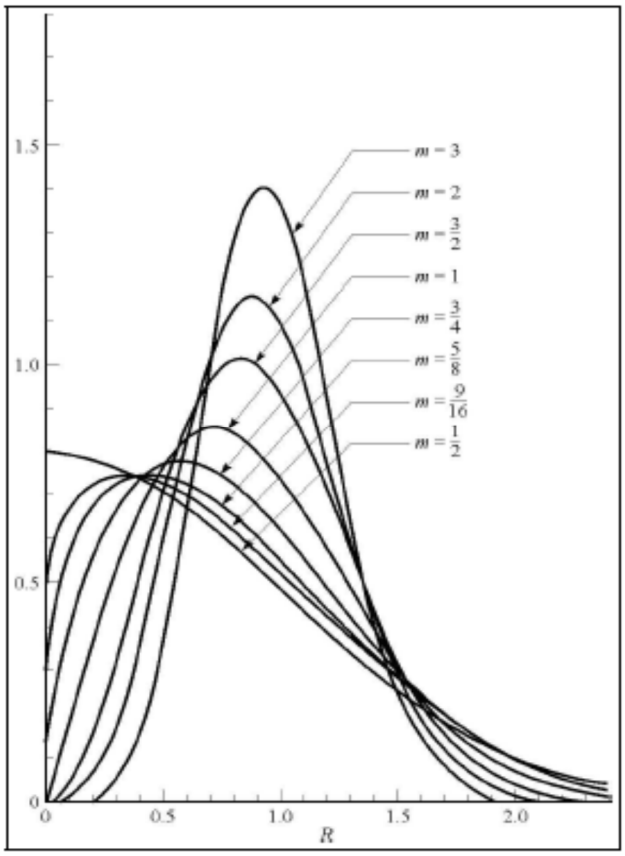


Figura 2.6 - Função densidade de probabilidade do *tipo Nakagami-m*, com $\Omega = 1$.

3. MODELOS DE PREDIÇÃO DO SINAL

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os modelos de propagação, tradicionalmente, são focados na predição do valor médio de sinal recebido a uma dada distância do transmissor (*path loss*) e frequência de operação. Estes modelos são úteis para estimar a área de cobertura de um sistema e são, normalmente, classificados como modelos de propagação de grande escala [14].

Na recepção com os dispositivos móveis, a aleatoriedade do sinal recebido, a cada instante, conduz a uma função de transferência do canal do tipo estocástica e é difícil se calcular a atenuação do sinal no enlace. Neste caso, modelos de predição de cobertura de sinal são usados para se determinar o nível médio de sinal em cada ponto da região, e a atenuação não segue uma equação determinística, mas empírica ou semi-empírica, em geral. Cálculos determinísticos contam, em geral, com o modelo de traçado de raios, sendo mais aplicados para cobertura *indoor*. Entre os modelos mais usuais para cobertura *outdoor*, citam-se como exemplos: *Okumura*, o de *Okumura-Hata*, *Lee*, *log-distance*e ITU-R.

Para se planejar um sistema móvel, é preciso que seja realizada uma predição dos campos que chegam a cada ponto da região a ser coberta pelo sinal. O modelo de predição ponto-a-ponto é uma ferramenta básica para a geração do mapa de cobertura do sinal e da área de interferência, mapa de ocorrência de *handoff* ou para a configuração do sistema ótimo. Devido aos inúmeros fatores em jogo, o que se faz, normalmente, é usar os cálculos já vistos de atenuação no percurso, modificados por parâmetros obtidos de medidas no campo. Baseados nisto, existem diversos modelos de predição na bibliografia levando em consideração, em geral, a topografia do terreno (vale, colina, etc...) e o tipo da área (urbana, suburbana, rural, etc...). Dentre eles, estão os modelos de SUI (…), Walfisch-Ikegami,… Uma vez estimada a predição de cobertura em determinada região, devem ser obtidas medidas em campo para se verificar a validade do modelo adotado e, em geral, ajustes terão que ser realizados para a otimização do sistema, tais como: altura de antena, mudança de sua localização, *tilt* na antena, etc...

Dentre os vários modelos encontrados na literatura [15-17] para predição de perdas no percurso para canais rádio móveis terrestres, encontram-se os modelos teóricos, empíricos e semi-empíricos.

3.2. CATEGORIAS DE MODELOS DE PREDIÇÃO

3.2.1. Modelos empíricos

Os modelos de propagação empíricos são aqueles desenvolvidos com base em campanhas de medições em ambientes específicos e que resultam em gráficos ou expressões matemáticas que permitem fazer previsões sobre o comportamento do sinal naquele determinado ambiente. Esses modelos são fortemente dependentes dos ambientes para os quais foram desenvolvidos e devem ser adaptados, quando aplicados em ambientes diferentes, devendo ser acrescentando algum fator de correção. Como casos clássicos de modelos empíricos, citam-se os modelos de *Okumura* [18] baseado em medições na área de Tóquio e *Hata* [8], que transformou os ábacos de *Okumura* em uma formulação empírica. Modelos empíricos, quando representados por expressões matemáticas, se caracterizam por serem de fácil implementação através de *softwares*, exigindo poucos recursos de processamento.

3.2.2. Modelos determinísticos

São modelos teóricos que se valem das leis do eletromagnetismo para desenvolver expressões que calculem o nível de recepção do sinal nos pontos desejados. Nestes modelos, o ambiente e a geometria são mais fáceis de serem descritos e modificados. A teoria de raios é uma técnica importante utilizada por estes modelos. Devem ser aplicados quando o processo não tem componentes aleatórias e é possível determinar o seu comportamento em qualquer instante do tempo. A maior dificuldade na aplicação desses modelos ocorre por conta do elevado consumo de recursos computacionais.

3.2.3. Modelos semi-empíricos

São modelos que se baseiam em fundamentos teóricos e dados experimentais, mesclando o modelo de traçado de raios com dados obtidos das medições para obter expressões que mostrem as variações sofridas pelo sinal no meio. O modelo de Walfisch-Ikegami [19] é um exemplo.

Antes de descrever sobre alguns modelos próprios para predição de sinal em ambientes com vegetação, é importante que se retorne ao modelo básico de propagação, conhecido como *Log-distance*, empregado como base em alguns dos modelos em vegetação.

3.3. Modelo *Log-distance*

O modelo de propagação Log-Distância, baseado no modelo de *Friis* aplicado em dois pontos do percurso e dos resultados experimentais de *Okumura*, visto na equação 2.7, tem a sua equação aqui repetida. Aparentemente, ele independe da frequência do sinal transmitido e do ganho das antenas transmissora e receptora e das perdas dos cabos, porém, isso não é verdade, tendo em vista que trabalha com a diferença de potência entre dois pontos, que é tanto maior quanto maior a frequência. Além disso, este modelo varia linearmente com o log(d/d_0), com isso a potência recebida diminui linearmente, em escala logarítmica, com o aumento da distância de separação(d) entre o transmissor e o receptor.

$$P_r(d) = P_r(d_0) - 10.n.log\left(\frac{d}{d_0}\right) \tag{3.1}$$

onde n é o coeficiente de perda no percurso e $P_r(d_0)$é o nível de potência média recebida no ponto de referência d_0.

A seguir, serão abordados alguns modelos existentes na literatura para predição de sinal em ambientes com vegetação.

3.4. Modelo ITU-R

O modelo ITU-R, também conhecido como ITU *Early ITU* [20]. É um modelo empírico, desenvolvido pela ITU, em 1988, valido para as frequências entre 200 MHz e 95 GHz e para distâncias entre antena transmissora e receptora inferior a 400 metros. Sua equação fornece a perda em excesso, devido à vegetação, que deverá ser adicionada à perda no espaço livre para calcular a perda total, é dada por:

$$\mathrm{A_{ITU-R}} = 0{,}2\ (\mathrm{f})^{0{,}3}(\mathrm{d})^{0{,}6} \tag{3.2}$$

- $\mathrm{A_{ITU-R}}$ → Atenuação em excesso segundo o modelo da ITU-R (dB);
- d → Distância que o sinal adentra na vegetação, ou seja, profundidade da vegetação (m);
- f → Frequência de operação do sistema (MHz).

3.5. Modelo Weissberger

Tendo como base o modelo de perda de propagação exponencial, *Weissberger* desenvolveu o modelo de perda de propagação conhecido como exponencial modificado (MED), sendo este válido para ambientes com vegetação com árvores que possuem folhagem seca em climas temperados [21]. Este modelo foi desenvolvido para faixa de frequência de 230 MHz a 95 GHz, e teve seus parâmetros empíricos determinados em campanhas de medições utilizam a faixa UHF (400-700 MHz).

Neste modelo, a perda ocasionada pela vegetação expressa por:

$$L(dB) = 0{,}45\ (f)^{0{,}284} d, \text{ para } d \leq 14 \text{ metros;} \quad (3.3)$$

$$L(dB) = 0{,}45\ (f)^{0{,}284} d^{0{,}588}, \text{ para } 14 \leq d \leq 400 \text{metros.} \quad (3.4)$$

- $L(dB) \rightarrow$ Atenuação em excesso (dB);
- $d \rightarrow$Distância que o sinal adentra a vegetação, ou seja, profundidade da vegetação (m);
- $f \rightarrow$Frequência de operação do sistema (GHz).

3.6. Modelo *Chen and Kuo*

Elaborado no início da de década de 90 por Chen e Kuo [22], para ambientes florestais, na faixa de 1 a 100 GHz, com base na teoria geométrica da difração, modelando o meio através de 4 camadas: ar, copa, tronco de árvores e solo. Eles fizeram medições espaçadas de 10 metros, com polarizações verticais e horizontais. Obtiveram as seguintes expressões:

$$Lv = (0{,}001f + 0{,}2)d + 0{,}5f + 3, \text{ polarização vertical;} \quad (3.5)$$

$$Lh = (0{,}0002f + 0{,}2)d + 0{,}03f + 2, \text{ polarização horizontal.} \quad (3.6)$$

3.7. Recomendação ITU-R P. 833-2

Nesta recomendação, é apresentada a atenuação em excesso devido à vegetação única e não vegetação densa e larga como uma floresta. Este modelo considera a perda em um caminho que passe por uma única árvore, até chegar ao terminal.

Em VHF e UHF, a atenuação específica apresenta valores relativamente baixos, e parte da vegetação no percurso é baixa. Com base nestas informações, foram desenvolvidos

dois modelos, uma para frequências acima e outra para abaixo de 3 GHz, conforme descrito a seguir:

- **Abaixo de 3 GHz**

$$Aet = d\,\gamma \tag{3.7}$$

onde *d* é percurso dentro da copa da árvore, em metros;γ é atenuação específica para caminhos vegetativos curtos e depende da frequencia e da polarização e *Aet* é a menor (ou igual) atenuação em excesso para todos os outros mecanismos.

- **Acima de 3 GHz**

Para frequências acima de 3 GHz, mais parâmetros são levados em consideração, conforme mostra a equação seguinte:

$$A = \frac{R\infty}{f^a w^b}\, d + \frac{k}{w^c}\left(1 - e^{-\frac{(R0-R\infty)w^c}{k}d}\right) \tag{3.8}$$

Onde *W* é a largura da iluminação da vegetação; *d* é a profundidade da vegetação, em metros; *f* é a frequência, em GHz; *a, b, c, k,* R_0 e $R\infty$ são constantes, que levam em consideração a folhagem das árvores, como mostra a Tabela 3.1

Constantes	Com Folhas	Sem Folhas
A	0,7	0,64
B	0,81	0,43
C	0,37	0,97
K	68,8	114,7
R_0	16,7	6,59
$R\infty$	8,77	3,89

Tabela 3.1 – Valores dos Parâmetros do modelo da ITU-R P. 833-2.

É importante frisar que os modelos citados do item 3.4 ao 3.7, tanto o receptor quanto o transmissor, não possuem mobilidade.

4. AMBIENTE E *SETUP* DE MEDIÇÕES

4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo será apresentado o ambiente onde foram realizadas as medições e todos os parâmetros considerados, com imagens do *setup* de transmissão e recepção, descrevendo todos os equipamentos utilizados com suas informações e características relevantes.

4.2. AMBIENTE SONDADO

O ambiente onde foram realizadas as medições foi a Praça Nilo Peçanha, localizada na Rua Passo da Pátria, S/N, no bairro São Domingos, em Niterói, local com vegetação variada em altura e espécie. A disposição das árvores pelo ambiente é aleatória, porém tendo áreas com maior concentração de árvores, áreas com pouca vegetação e algumas sem árvores (clareiras). No entorno da praça temos construções e avenidas com grande fluxo de automóveis e pedestres, típico de um parque urbano. No local existe um restaurante, conhecido como Solar do Jambeiro, fazendo com que a praça tenha ainda mais fluxo de pessoas.

Figura 4.1 – Vista aérea da Praça Nilo Peçanha.

A Figura 4.1mostra a vista aérea da Praça Nilo Peçanha, com a indicação das duas rotas escolhidas para realizar as medições, onde as setas indicam o sentido do movimento do receptor em relação ao transmissor.

A seguir, serão descritas detalhadamente as características de cada rota.

4.2.1. Rota 1

Esta rota tem um comprimento de 57 metros e tem seu início na entrada da Praça que fica na Avenida Passo da Pátria, voltada para a entrada da UFF, onde foi montado o sistema de transmissão. O começo desta rota caracteriza-se pela presença de vegetação em ambos os lados, com árvores de tamanho variando entre 7 e 10 metros de altura e não muito próximas umas das outras. Destaca-se que essas árvores têm uma espécie de vegetação caindo por sobre os galhos mais baixos e pelo seu tronco, fazendo com que tenha presença de vegetação em partes abaixo das copas. Cerca de 16 metros à frente, a rota apresenta uma curva à esquerda e, nesse ponto, há uma área mais aberta à direita da rota (parte central da praça), uma clareira, tendo presença de vegetação somente à esquerda da rota. A partir da curva, até o ponto final da rota, há vegetação em ambos os lados, com alturas entre 7 e 12 metros. Nesse trecho final da rota 1, a vegetação do lado da esquerdo da rota é a que efetivamente atua como obstrução para o receptor, sendo esta vegetação mais concentrada que a existente no início da mesma, como mostra as Figuras 4.2, 4.3, 4.5 e 4.6.

Figura 4.2 – Rota 1.

Figura 4.3 – Vista do final da rota 1.

4.2.2. Rota 2

A rota 2 tem 59,2 metros de comprimento e seu início coincide com o da rota 1, tendo as mesmas características. A partir do centro da praça, esta rota passa a ter uma área aberta nos seus dois lados, de aproximamente 15 metros, e, em seguida, volta a ter uma concentração maior de vegetação à direta, porém com árvores de altura mais baixas, em torno de 5 metros, em menor volume e mais distantes umas das outras, se comparado ao segundo trecho da rota 1, como visto nas Figuras 4.4 a 4.6.

Figura 4.4 - Vista do final da rota 2.

As duas rotas apresentam algumas particularidade, o trecho inicial das duas rotas são comuns, até o centro da praça, onde a rota 1 segue para esquerda e a rota 2 para direita, nesse trecho em comum o transmissor e receptor estão em linha de visada (LOS), tendo a rota 2 um trecho maior em visada, pois possui uma área mais aberta na metade do seu trecho, na parte final de cada rota temos para rota 1 uma grande concentração de vegetação, densa, em ambos os lados e com alturas entre 8 e 12 metros, para rota 2, temos maior concentração do lado direto, não muito densa, porém com alturas variando entre 5 e 7 metros.

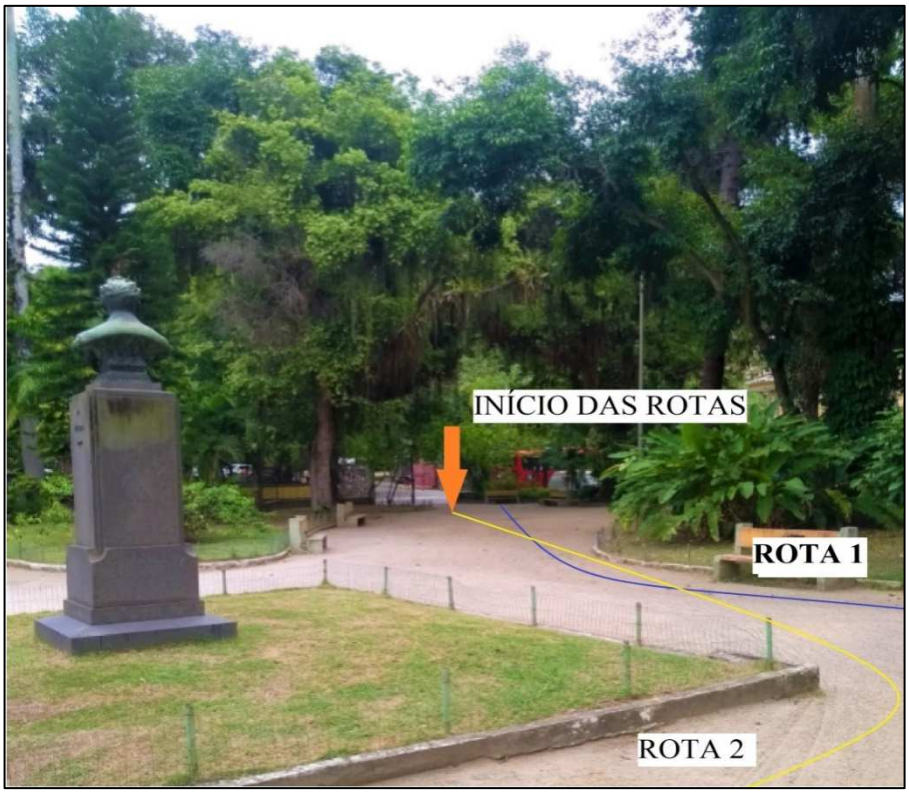


Figura 4.5 - Início das rotas visto do centro da Praça.

Figura 4.6 - Rotas 1 e 2.

4.3. *SETUP* DE MEDIÇÕES

No dia da medição, o céu estava claro e não choveu, havia uma circulação baixa de pedestres na praça e uma considerável circulação de automóveis no seu entorno. Foram transmitidos cinco sinais CW, em duas alturas da antena transmissora, Htx1: 1,7 metros e Htx2: 4,2 metros. As cinco frequências (portadoras) estão na faixa 705 - 4000 MHz, com os valores de potência na saída do gerador mostrados na Tabela 4.1, para um valor de entrada de 3dBm, configurado no equipamento:

Frequência (MHz)	Potência Saída Gerador de Sinal (dBm)
705	1,84
1790	0,52
2400	-0,08
3500	-14,85
4000	-13,15

Tabela 4.1 – Potencia na Saída do Gerador de Sinal.

O sistema de transmissão estava localizado em uma área fora do ambiente onde se realizaram as medições, na entrada da UFF (Campus Praia Vermelha), como já mostrado na Figura 4.1. Este local foi escolhido devido às facilidades como: fornecimento de energia e segurança, ambas oferecidas pela própria universidade.

A Figura 4.7 mostra a antena transmissora na altura de 1,7 metros, com vista para a Praça Nilo Peçanha.

Figura 4.7 – Antena Transmissora em 1,7 metros.

Os equipamentos, dispositivos e acessórios usados na transmissão e na recepção do sinal, estão listados na Tabela 4.2.

SISTEMA DE TRANSMISSÃO	
EQUIPAMENTO/DISPOSITIVO	**ESPECIFICAÇÕES**
Gerador vetorial de Sinal MG3700A, Anritsu	250 kHz a 6 GHz
Amplificador de potência ZHL-16W-43+, Minicircuits	Ganho variando de 40 a 47dB para a faixa de 700-4000MHz
Fonte Digital PS-5000, Icel	2 fontes de 0-30 V/03 A e 1 de 0-5V/3 A
AntenaOmniI-ATO-380- 6000,RFS	ganho variando de 1 a 6dB
Cabo Anritsu, de 1 m	50 ohms (do gerador de sinais para o PA)
Cabo R&S, de 1,7 m	50 ohms (do amplificador para a antena transmissora)
Cabo Nacional, de 1 m	Cabo adicional para ligar a antena TX à maior altura de antena (= 4,2 m)

SISTEMA DE RECEPÇÃO	
EQUIPAMENTO/DISPOSITIVO	**ESPECIFICAÇÕES**
Antena Multi Band OmniMA-CQ27-1X, 380 MHz - 6 GHz, MARS	ganho variando de 3 a 6dB
Analisador de Sinal MS2692A,Anritsu	50Hz-26,5GHz
Cabo Anritsu, de 1 m	50 ohms (da antena até o analisador)

Tabela 4.2 – Lista de equipamentos de Transmissão e Recepção.

4.4. *SETUP* DE TRAMSMISSÃO

O *setup* de transmissão foi composto pelo gerador vetorial de sinais, o amplificador de potência, antena RFS e três cabos coaxiais, interligando o gerador ao amplificador e o amplificador à antena. Ressalta-se que para altura de transmissão de 1,7 metros foram usados somente os dois primeiros. Foi utilizada uma fonte de tensão para alimentação do amplificador de potência. Os equipamentos de transmissão foram montados e organizados na entrada da UFF (Campus Praia Vermelha), na Rua Passos da Pátria, conforme mostra as Figuras 4.8 e 4.9.

Figura 4.8 – *Setup* de transmissão com altura da antena de 1,7metros.

Figura 4.9 – *Setup* de transmissão com altura da antena de 4,2 metros.

4.4.1. Descrição dos equipamentos de transmissão

Nos tópicos seguintes serão descritos, de forma mais detalhada, os equipamentos utilizados na transmissão do sinal rádio.

4.4.1.1. Gerador vetorial de sinal

O gerador de sinal MG3700A, mostrado na Figura 4.10, trabalha com sinais vetoriais e pode gerar sinais em banda básica em alta velocidade, o que permite a modulação e transmissão em banda larga. Neste trabalho, foram utilizadas cinco portadoras CW (*Continuous Wave*), sem modulação, nas frequências mencionadas anteriormente. Este equipamento apresenta algumas características importantes como: faixa de frequências de transmissão de 250 kHz a 6 GHz; transmissão modulada em banda larga até 150 MHz; alta capacidade de *buffer* (até 512.000 amostras/canal); armazenamento interno de 40 GB e transmissão simultânea de dois sinais.

Figura 4.10- Gerador de sinais *Anritsu*MG3700A.

4.4.1.2. Amplificador de Potência

O amplificador de potência (PA) mostrado na Figura 4.11, opera na faixa de frequência de 1800 até 4000 MHz e fornece um ganho que vai de 40 a 50 dB, conforme descrito em seu *datasheet*, porém, os ganhos reais e atualizados para faixa em estudo, foram levantados em laboratório (LAPROP), como mostra a Tabela4.3.Uma vez que só se transmitiu o sinal CW, com pouca mobilidade, o mesmo sofria Doppler mínimo, não afetando o ganho da portadora. Assim, como em 705 MHz o PA já fornecia alto ganho, foi empregado em todas as medições.

A alimentação do amplificador de potência é de 28 VDC e 4,3 A, sendo fornecida por uma fonte da ICEL, modelo PS-5000.

Figura 4.11- Amplificador de Potência: Mini-circuits ZHL-16W-43+.

Frequência (MHz)	Ganho (dB)
705	40
1790	43,8
2400	41,2
3500	45,8
4000	46,8

Tabela 4.3 – Tabela de Ganho do Amplificador de Potência.

4.4.1.3. Cabos Coaxiais

Para realizar as medições, foi necessário o uso de cabos coaxiais para ligação do gerador de sinais ao amplificador e do amplificador à antena de transmissão. Foram usados três cabos cujas atenuações foram medidas em laboratório, para cada frequência portadora empregada, com o analisador vetorial de rede MS2038A, e estão descritas na Tabela 4.4.

Frequência (MHz)	Perda (dB) (Cabo *Anritsu*)	Perda (dB) (Cabo R&S)	Perda (dB) (Cabo Nacional)
705	1,8	1,8	1,7
1790	1,9	2,1	5,5
2400	0,9	0,1	1,6
3500	3,65	3,4	1,6
4000	5,9	2,6	3,0

Tabela 4.4– Perdas nos Cabos para as portadoras empregadas.

4.4.1.4. Antena Transmissora

Esta antena é omnidirecional, com polarização linear e vertical, projetada especificamente para instalações ultra banda larga e ambiente *Indoor*. É construída com materiais leves, adequados para montagem no teto. Foi aqui usada invertida, como se vê na Figura 4.12 de forma a receber adequadamente o sinal vindo da antena transmissora. Opera na faixa de frequência de 380 até 6000 MHz, e fornece um ganho máximo que varia de 1 a 6 dB, dependendo da frequência que está operando. Esta antena, entretanto, apresenta diagramas de irradiação horizontal e vertical, Figuras 4.13 e 4.14, respectivamente, fazendo com que seu ganho máximo varie de acordo com o ângulo entre o transmissor e o receptor. Este ângulo, em Htx1 e Htx2, para as duas rotas foram iguais (~90°).

Para as duas alturas de transmissão, em ambas as rotas, foram calculadas o ganho real para frequência, como mostrado na Tabela 4.5.

Figura 4.12– Antena de Transmissão RFS.

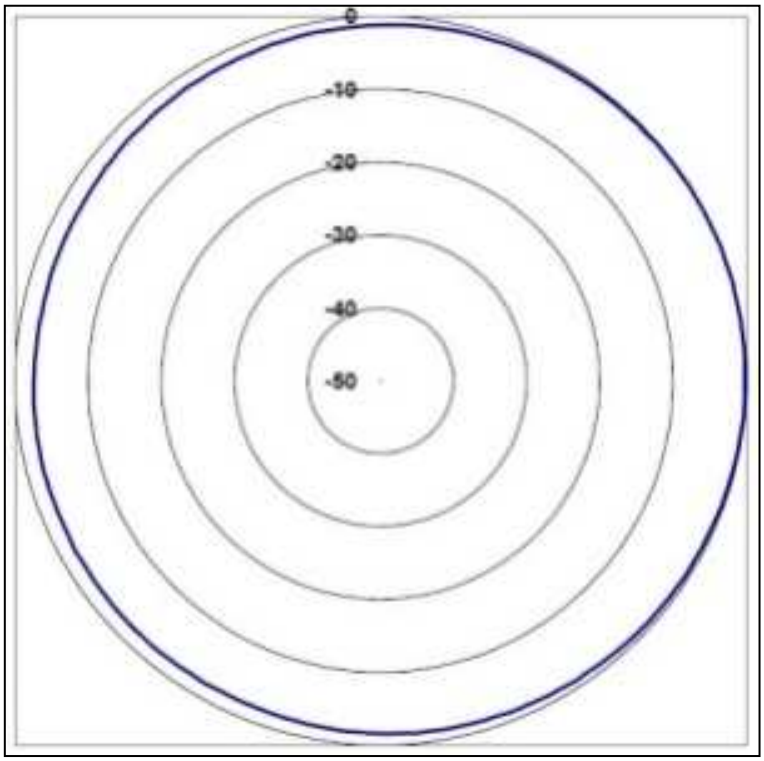


Figura 4.13 – Diagrama de Irradiação Horizontal da antena transmissora

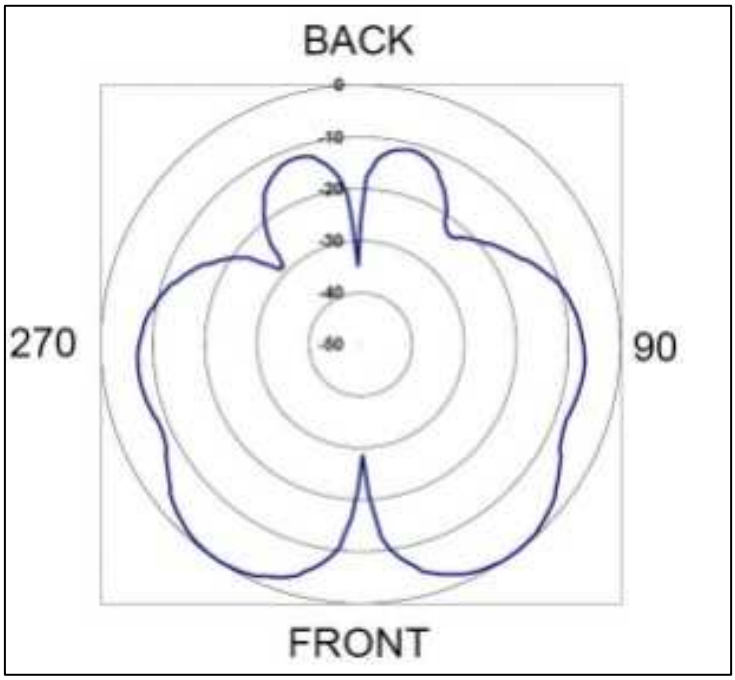


Figura 4.14 – Diagrama de Irradiação Vertical da antena transmissora.

Frequência (MHz)	Ganho(dB) RFS	Valor do Diagrama (~ 90º)	Valor Ganho real(dB)
705	1	-5	-4
1790	5	-5	0
2400	6	-5	1
3500	6	-5	1
4000	6	-5	1

Tabela 4.5– Ganho Real Antena de Transmissão.

4.4.2. Parâmetros configurados na transmissão

Os parâmetros configurados no *setup* de transmissão são os seguintes:

- Frequências da portadora: 705, 1790, 2400, 3500 e 4000 MHz;
- Modulação: onda contínua (CW) sem modulação;
- Potência de saída do gerador: conforme tabela 3;
- Ganho do amplificador: 40, 44,41, 46 e 47 dB, respectivos às frequências usadas;
- Ganho da antena TX: conforme tabela 7;
- Perda nos cabos: conforme tabela6.

4.5. *SETUP* DE RECEPÇÃO

O *setup* de recepção foi montado em um carrinho para facilitar a locomoção dentro da Praça Nilo Peçanha, como mostra a Figura 4.15, utilizando um Analisador de Espectro com alimentação de energia vinda de uma tomada 127 v, localizada no SINTUFF, ao lado da praça; uma antena receptora omnidirecional e um cabo de 1 m.

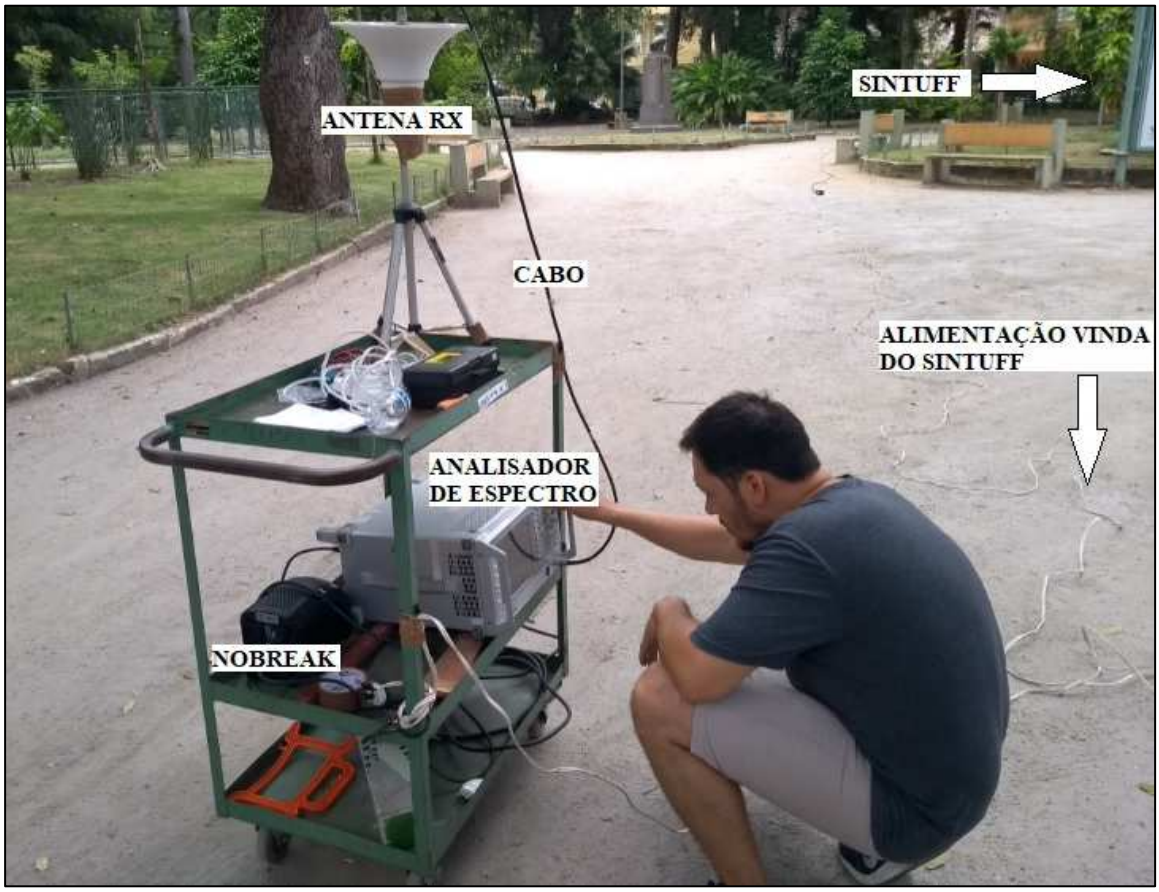


Figura 4.15–*Setup* de Recepção.

4.5.1. Descrição dos equipamentos de recepção

Nos tópicos seguintes, serão descritos de forma mais detalhada, os equipamentos utilizados na recepção do sinal rádio.

4.5.1.1 Analisador de Sinal

O Analisador de operou como analisador de espectro com RBW = 3 kHz, e *span* nulo, seu tempo de varredura pode variar de 10 µs a 600s (*zero span*) e em cada varredura ele capturou 10001 amostras do sinal. O equipamento possui memória interna, que foi usada para salvar os dados medidos, assim não houve necessidade de instalar um *laptop* integrado para fazer o armazenamento.

Figura 4.16- Analisador de Espectro *Anritsu* MS2692A.

4.5.1.3. Cabos Coaxiais

Para conectar o Analisador de Espectro à antena de recepção, foi usado um cabo de 1 metro e sua atenuação em cada frequência foi levantada no laboratório com o analisador vetorial de rede MS 2038A e está descrita na Tabela 4.6.

Frequência (MHz)	**Perda (dB)** (Cabo *Anritsu*)
705	1,8
1790	2,2
2400	0,12
3500	3,7
4000	4,9

Tabela 4.6 – Perdas nos Cabos para as portadoras empregadas.

4.5.1.4. Antena receptora

Esta antena é omnidirecional, com polarização linear e vertical, projetada especificamente para instalações ultra banda larga e ambiente *indoor*. É construída com materiais leves, adequados para montagem no teto, como mostra a Figura 4.17. Opera na faixa de frequência de 380 até 6000 MHz e fornece um ganho máximo que varia de 1 a 6dB (*Datasheet*), dependendo da frequência que está operando. Esta antena, no entanto, apresenta diagrama de irradiação vertical variando com a frequência, fazendo com que seu ganho

máximo varie de acordo com o ângulo entre o transmissor e o receptor. No apêndice A, consta os diagramas da antena. Este ângulo teve um valor próximo na Htx1, para as duas rotas eum valor similar em Htx2, para as duas rotas. Para as duas Rotas, foi calculado o ganho real para cada frequência, em cada Htx, obtido a partir do diagrama de irradiação como mostrado nas Tabelas 4.7 e 7.8.

Figura 4.17 Antena de Recepção RFS.

Frequência (MHz)	Ganho (dB) RFS	Valor do Diagrama (~ 90º)	Valor Ganho real (dB)
705	3	-2,5	-0,5
1790	5	-6,5	-1,5
2400	6	-11,5	-5,5
3500	6	-5	1
4000	6	-7	-1

Tabela 4.7 - Ganho real da antena de Recepção para Htx = 1,7 metros.

Frequência (MHz)	Ganho(dB) RFS	Valor do Diagrama (~ 90º)	Valor Ganho real(dB)
705	3	-2	1
1790	5	-6,5	-1,5
2400	6	-8	-2
3500	6	-4,5	1,5
4000	6	-6	0

Tabela 4.8 - Ganho real da antena de Recepção para Htx = 4,2 metros.

4.5.2. Configuração de recepção

Os dados eram medidos durante 60 segundos, para cada rota e armazenados na memória interna do Analisador de Espectro MS2692A. Para uma boa coleta de dados e correto funcionamento do *setup* de recepção, alguns parâmetros necessitaram ser configurados no analisador de sinal para permitir a captura e o processamento do sinal. Dentre eles estão:

- Frequência central: 705, 1790,2400, 3500 e 4000 MHz;
- *Span* (varredura do espectro): 0;
- RBW (resolução da largura de banda) = 3 kHz;
- Ganho da antena: conforme tabelas 9 e 10;
- Tempo de captura (por segundo): 60s;
- Amostragem: 10001 amostras/varredura
- Taxa de Amostragem necessária (= 20 v/λ): 75,2(705 MHz), 190,9(1790 MHz), 256(2400 MHz), 375,3(3500 MHz), 426,6(4000 MHz) amostras/segundo;

Vale ressaltar que, nas somente na menor frequência (705 MHz), a taxa de amostragem empregada foi superior a 20 v/λ [19], valor usualmente empregado a fim de se detectar os *fadings* profundos em ambiente *outdoor*. Assim, só se calculou a estatística de pequena escala para essa frequência.

5. COLETA EPROCESSAMENTO DE DADOS

Para a realização das medições, foi necessário fazer um estudo prévio dos equipamentos e do ambiente no qual as medições seriam feitas, com algumas visitas ao local, com o objetivo de conhecer o ambiente, verificar os possíveis pontos de energia para instalação dos equipamentos e selecionar as melhores rotas, segundo algumas características como: possibilidade de trafegar com carrinho que levaria o equipamento de recepção, característica da vegetação, existência de construções no interior e no entorno da Praça Nilo Peçanha e fluxo de pessoas no local. Foram realizadas medições prévias no local para verificar o comportamento do sinal nas frequências desejadas, a fim de que os equipamentos e programas fossem calibrados, em laboratório, de acordo com os objetivos desejados.

No laboratório de propagação da UFF (LAPROP), foram levantadas, em cada frequência portadora usada, as curvas de perdas dos cabos utilizados na recepção e transmissão, o ganho do amplificador, e a potência de saída do gerador de sinal. Com isso, verificou-se que as perdas dos cabos de RX e TX e do ganho do amplificador aumentam com o aumento da frequência, em 80% dos casos, como apresentado nas Tabelas 6, 8 e 5, respectivamente. Além disso, percebe-se que para frequência de 2400 MHz tem-se uma diminuição significativa na perda nos cabos, se comparado à frequência de 1790 MHz.

O ganho das antenas foi considerado conforme instruções de seus *datasheets* e levaram-se em consideração os seus diagramas de irradiação para cálculo do ganho real.

Foi desenvolvido um *software* de captura no *Matlab*®, que coleta o *trace* da medida no analisador no *Span Zero*. Cada *trace* fornece 10.001 pontos de medição por varredura, onde cada varredura teve a duração de 60 segundos, levando a um a taxa de amostragem igual a 10.000 amostras/min (= 166.67 amostras/s), suficiente para capturar o *fading* profundo do sinal recebido [5] apenas em 705 MHz. Os dados, das medições nas duas rotas, foram adquiridos pelo analisador de sinal, na opção de analisador de espectro, e salvos na memória interna do mesmo, para posterior processamento.

Inicialmente, através do processamento dos dados obtidos nas medições, observou-se que as rotas tinham comportamento muito diferente quando obstruídas com menos ou mais vegetação. Tal constatação foi de grande importância para a modelagem do canal, que será apresentada no capítulo 6.

Assim, ambas foram divididas em dois trechos, sendo estes em torno de 52m para a rota R1nas duas alturas de transmissão e 70 m para a rota R2. Em seguida, obteve-se a estatística

de pequena escala para as medições em ambas as rotas, para cada trecho em que foram divididas, nas duas alturas de transmissora diferentes, mas apenas em 705 MHz. Os resultados se encontram no Apêndice B e, nas Figuras 5.1 e 5.2 são apresentados os gráficos para a rota 1 na Htx = 1,7m, no primeiro trecho(T1) e para o segundo trecho (T2). Observa-se que a FDP que melhor se ajustou aos dados foi a *Nakagami*, conforme mencionado no item 2.8.2. Além disso, foi calculada a verossimilhança das FDP que melhores se ajustaram em cada rota, nos dois trechos, ratificando que Nakagami foi a que melhor se ajustou, como mostra a Tabela 5.1.

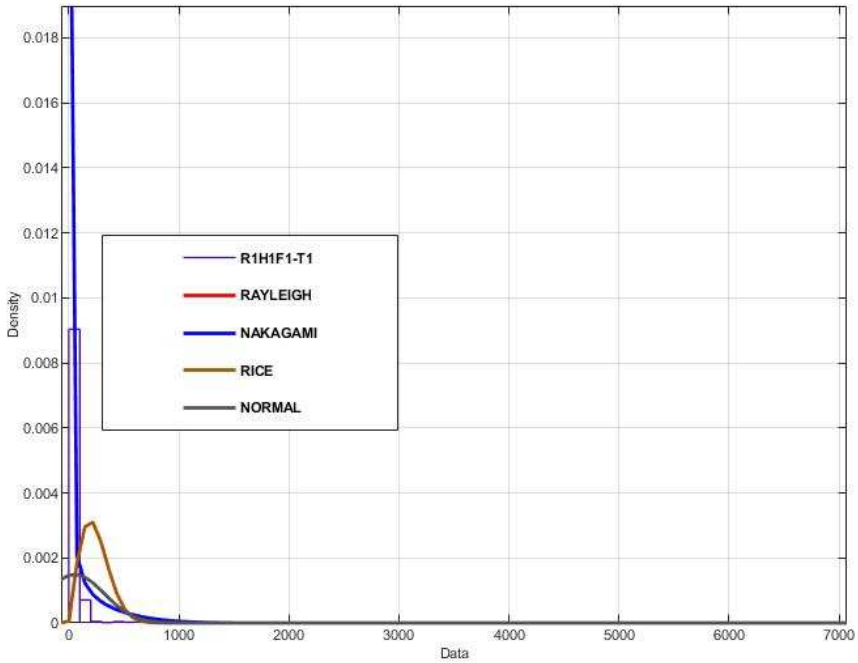


Figura 5.1 – Funções densidade de probabilidade para rota 1(T1).

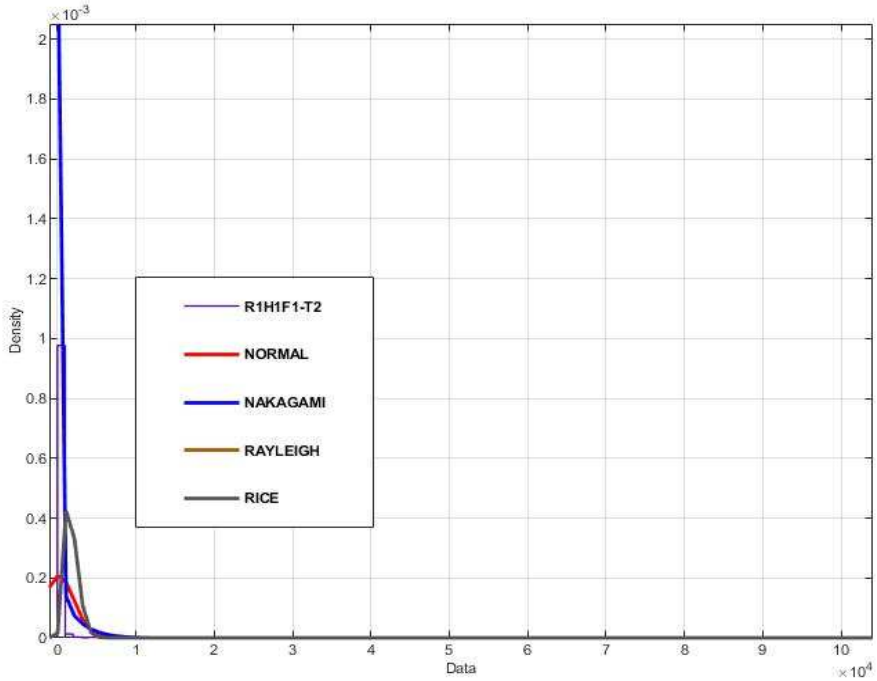


Figura 5.2 – Funções densidade de probabilidade para rota 1(T2).

Trecho	1		2	
FDP	*Nakagami*	*Lognormal*	*Nakagami*	*Lognormal*
R1H1F1	**- 5048**	- 7849	**- 4435**	- 8986
R1H2F1	**- 2273**	- 4370	**- 2974**	- 5823
R2H1F1	**- 12461**	- 15269	**- 2156**	- 4952
R2H2F1	**- 6881**	- 14874	**- 2052**	- 3652

Tabela 5.1 – Verossimilhança entre dados e FDP

Para a análise da estatística de grande escala, analisam-se distâncias maiores se comparadas ao comprimento de onda. O maior comprimento foi para a frequência de 750 MHz, igual a 0,42 metros, e a menor distância de medição foi igual a 33,7 metros, sendo que o modelo *lognormal* teve o melhor ajuste em todas as frequências, alturas de antena e rotas. As Figuras 5.3 a 5.6 exemplificam alguns dos resultados para as rotas: R1H1F2, R1H2F5, R2H1F2, R2H2F5, respectivamente, onde "R" refere-se à Rota, "H" à altura e "F", à frequência. Como exemplo: R1H1F1 é a rota 1, na altura de transmissão 1 (= 1,7 m) e frequência 1 (= 705 MHz).

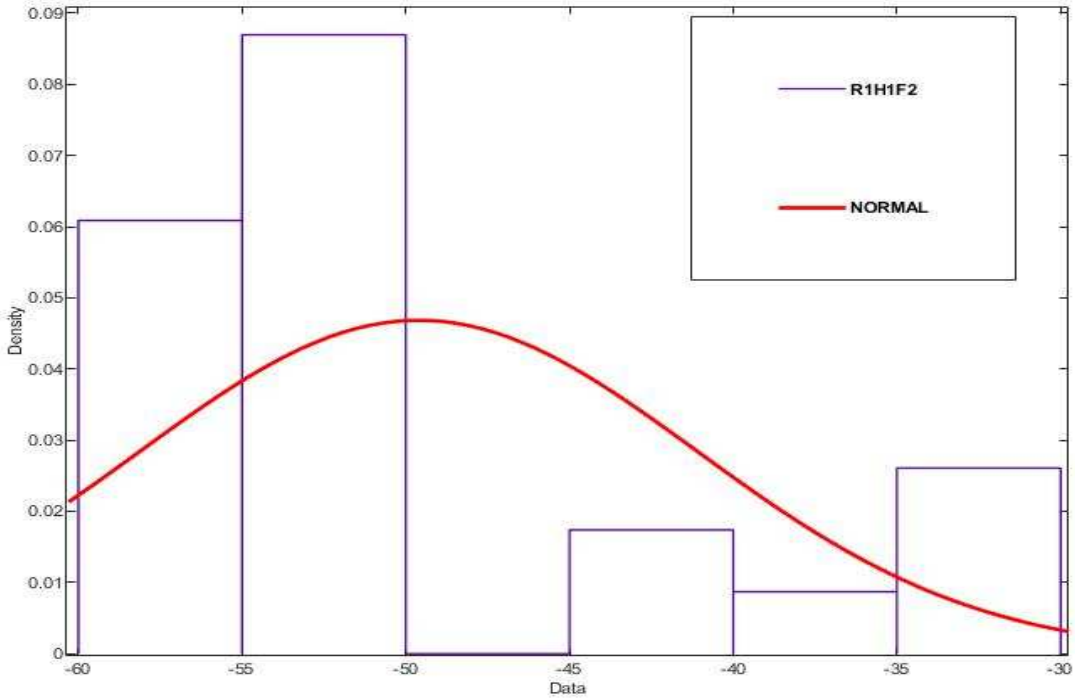


Figura 5.3 – Função densidade de probabilidade R1H1F2.

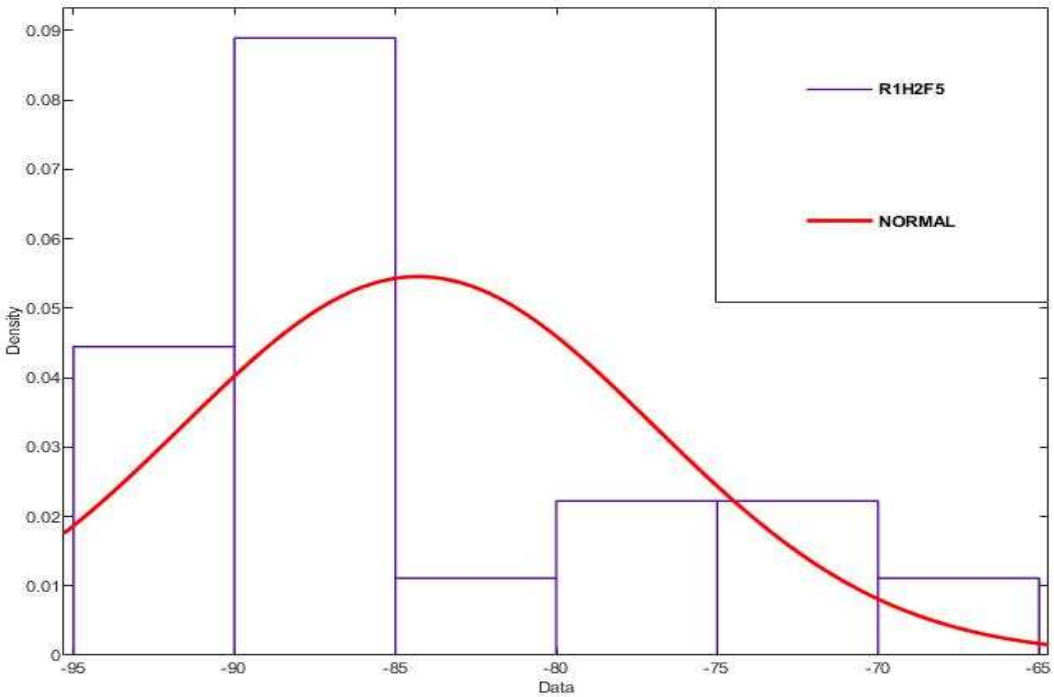


Figura 5.4 – Função densidade de probabilidade R1H2F5.

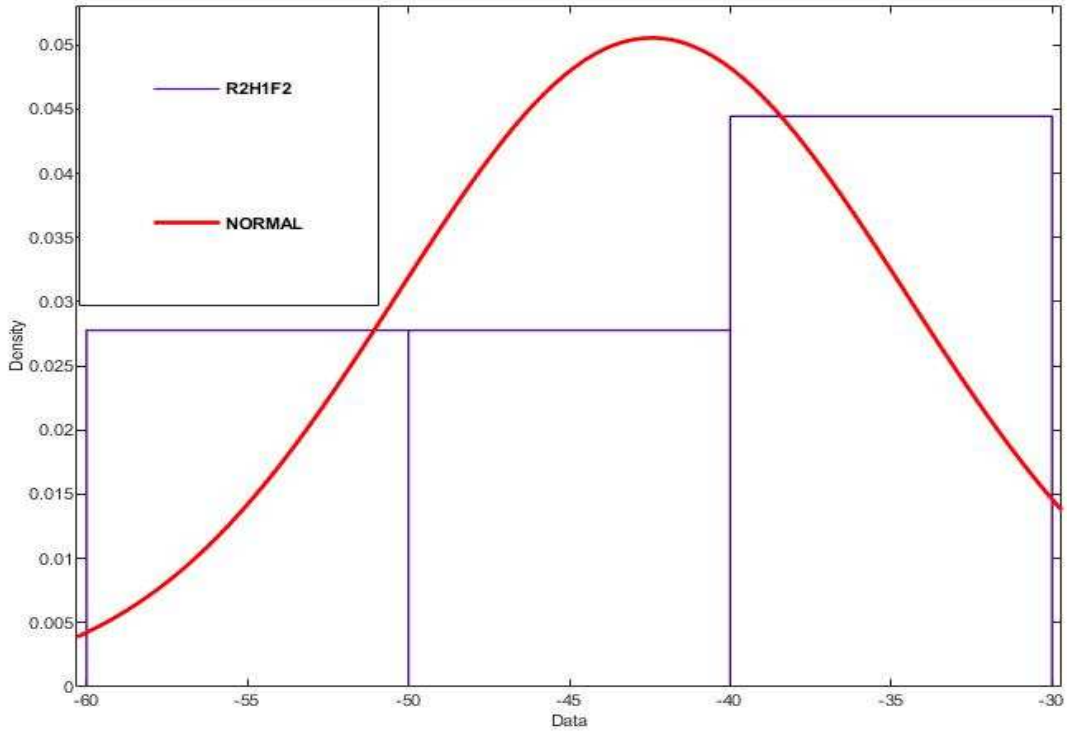


Figura 5.5 – Função densidade de probabilidade R2H1F2.

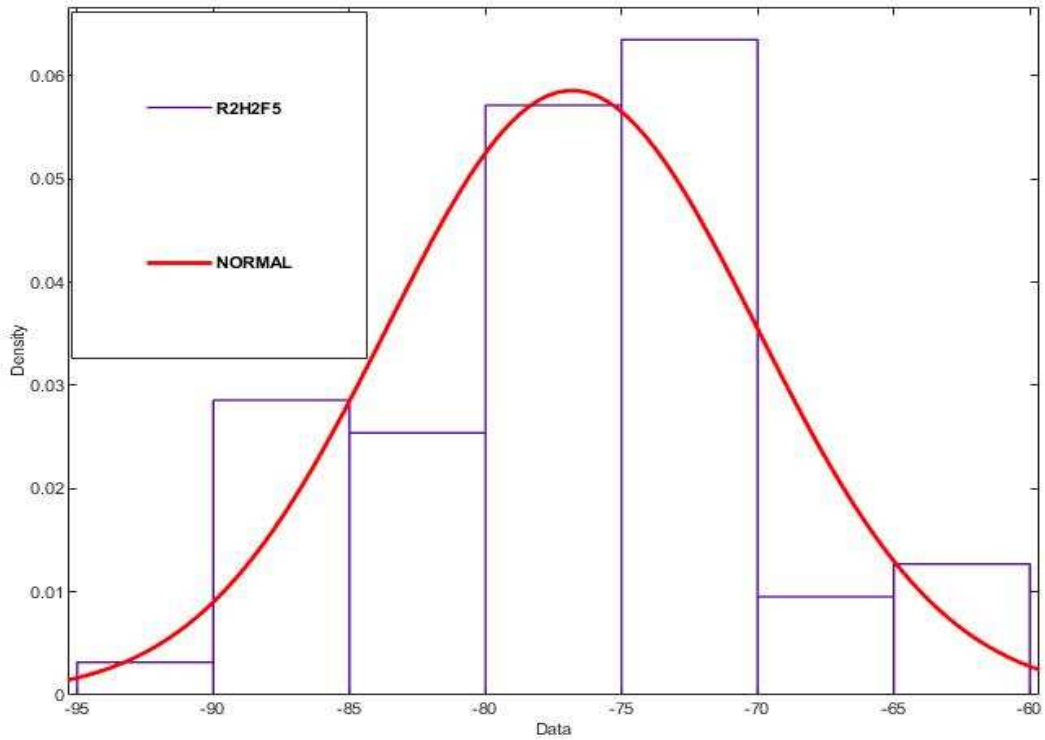


Figura 5.6– Função densidade de probabilidade R2H2F5.

Para a *path loss,* foi obtida a curva do nível médio de potência média (dBm) recebida ao longo de cada trecho de rota e, também, a curva da perda média, para cada frequência, em cada altura de transmissão. Para tal, foi empregado o processo de setorização [5-23], de forma a se obter, o sinal de variabilidade de grande escala (*fading* lento) e, então, a perda no percurso (*Path Loss*), para cada frequência e altura de antena. Esta última foi comparada aos modelos de predição de perda citados no capítulo 3. Antes, porém, tomando-se o eixo de distâncias normalizado para o valor inicial na rota, definido por *d0*, em escala logarítmica, o coeficiente de perda "*N*" com a distância foi calculado, partindo de (2.7), para cada combinação: rota, altura de transmissão e frequência, que se encontram na Tabela 5.1, onde "R" refere-se à Rota, "H" à altura e "F", à frequência. Como exemplo: R1H1F1 é a rota 1, na altura de transmissão 1 (= 1,7 m) e frequência 1 (= 705 MHz).

ROTA 1	*"N"*	*ROTA 2*	*"N"*
R1H1F1	6,96	**R2H1F1**	5,57
R1H1F2	6,86	**R2H1F2**	5,08
R1H1F3	3,29	**R2H1F3**	4,49
R1H1F4	6,74	**R2H1F4**	3,49
R1H1F5	6,16	**R2H1F5**	4,3
R1H2F1	3,52	**R2H2F1**	5,77
R1H2F2	5,79	**R2H2F2**	3,7
R1H2F3	4,13	**R2H2F3**	3,0
R1H2F4	5,5	**R2H2F4**	3,8
R1H2F5	5,72	**R2H2F5**	4,47

Tabela 5.2 – Coeficiente de perda "*N*" nas diferentes composições de rota, altura da antena transmissora e frequência

Os resultados mostram que o coeficiente de perda "N" diminui, exceto da rota R1H1F3 para rota R2H1F3, quando comparamos os valores obtidos na rota 1 com os da rota 2, para a mesma altura de transmissão H1. Isso se deve ao fato de na rota 1 termos mais obstrução de vegetação e pouca área aberta ao longo do percurso, se comparada à rota 2, que, apesar de também possuir vegetação, tem uma área maior de clareira no seu caminho. Para Htx2 também ocorre à diminuição de "N", exceto da rota R1H2F1 para R2H1F1

Em uma análise na mesma rota, comparado os valores medidos na altura H1 com os medidos em H2, percebe-se que para R1 temos: de forma geral os valores de "N" diminuindo

com o aumento da altura (exceto de R1H1F3 para R1H2F3), isso mostra que o aumento na altura de transmissão ocasionou em um aumento do nível médio de potência recebida. Já para R2 verificamos que para maioria das medições, 67% dos casos, ocorre aumento do coeficiente de perda "N" com aumento da altura de transmissão, pois ao aumentar a altura da antena transmissora, ocorre aproximação com a altura média da copa das árvores, onde a atenuação tende a ser maior devido ao volume de folhas e galhos atravessados pelo sinal em propagação, causando mais atenuação e espalhamento de sinal. A seguir, nas Figuras 5.7 a 5.10, são apresentados alguns dos gráficos para análise dos diversos modelos citados no capítulo 3 e comparação com perda do sinal. Os gráficos de todas as rotas restantes serão apresentados no Apêndice C.

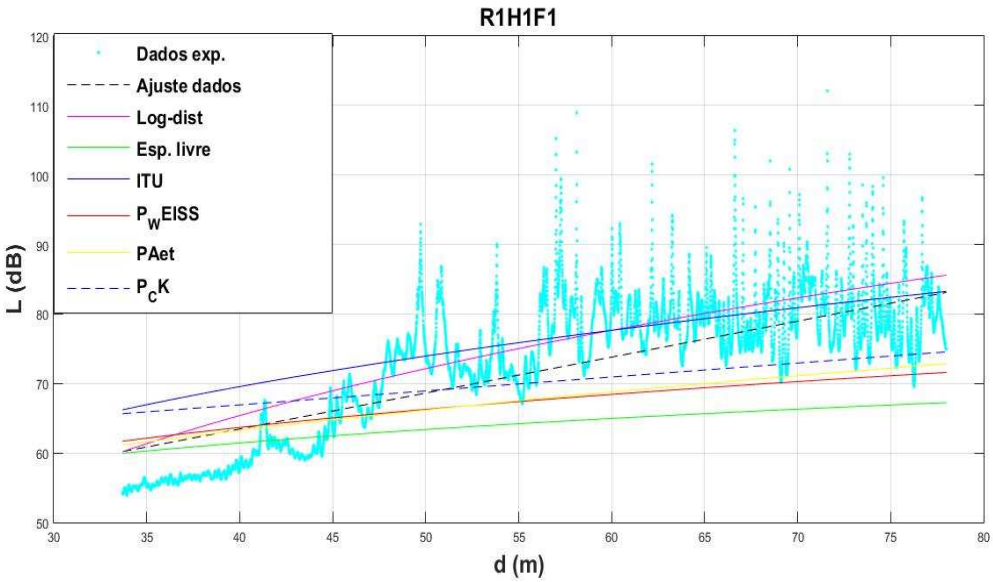


Figura 5.7 – Gráfico da Perda calculada e modelos teóricos x Distância-R1H1F1.

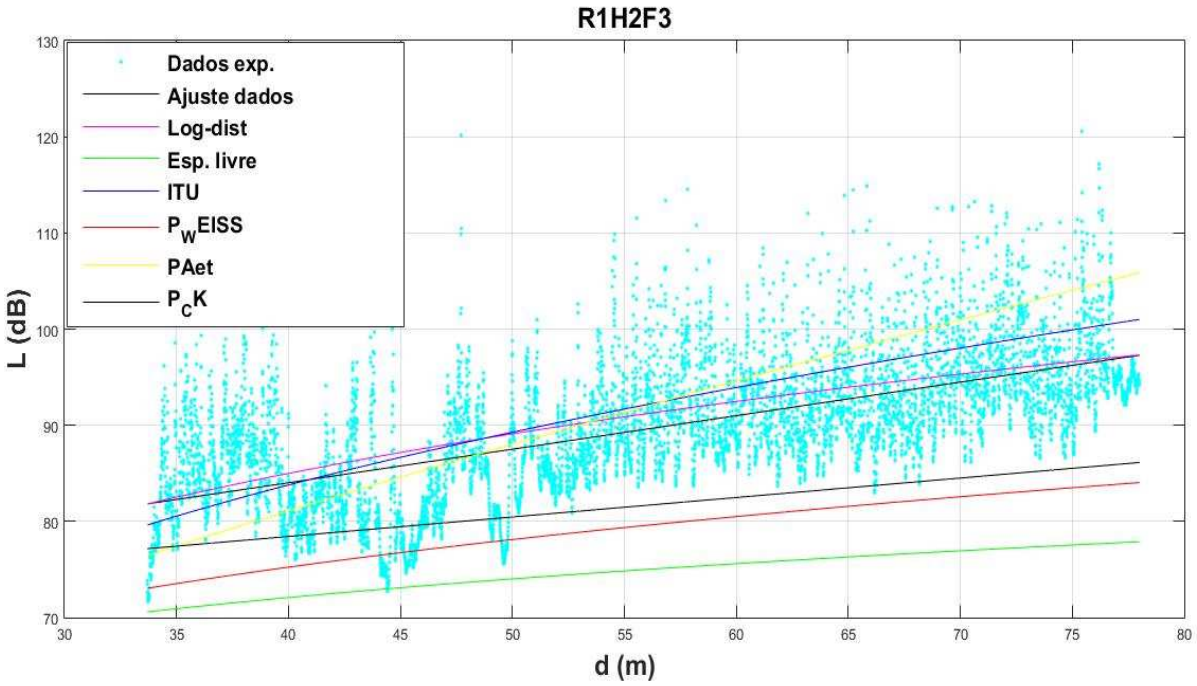


Figura 5.8– Gráfico da Perda calculada e modelos teóricos x Distância-R1H2F3.

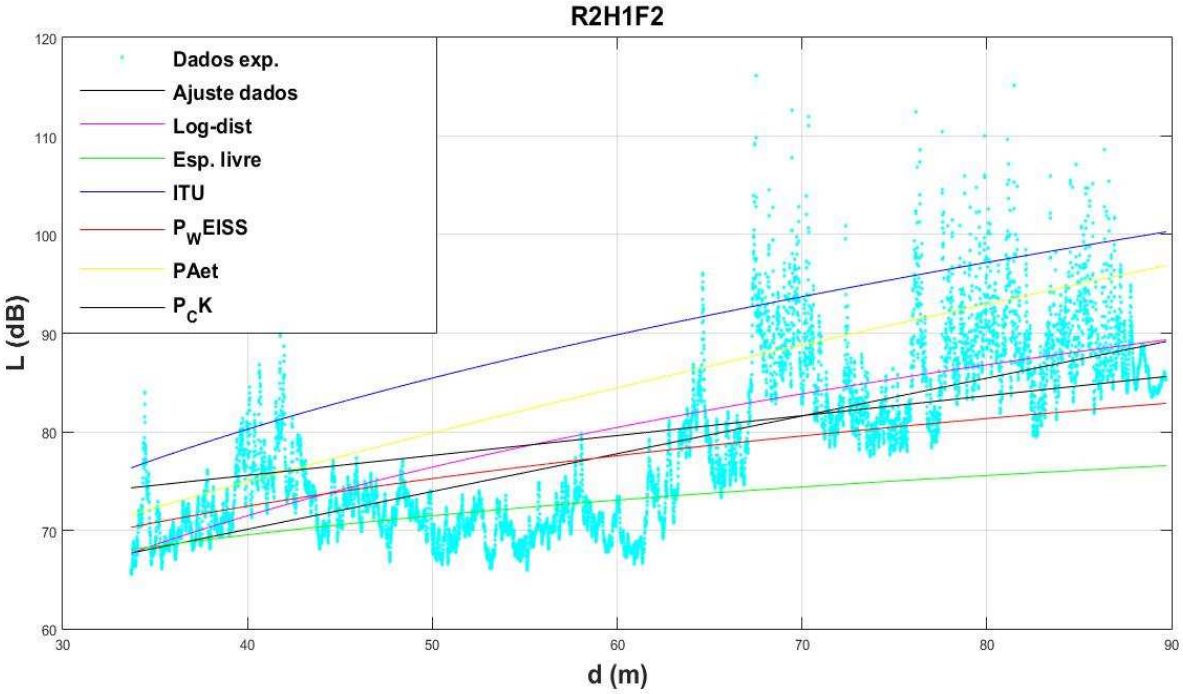


Figura 5.9 – Gráfico da Perda calculada e modelos teóricos x Distância-R2H1F2.

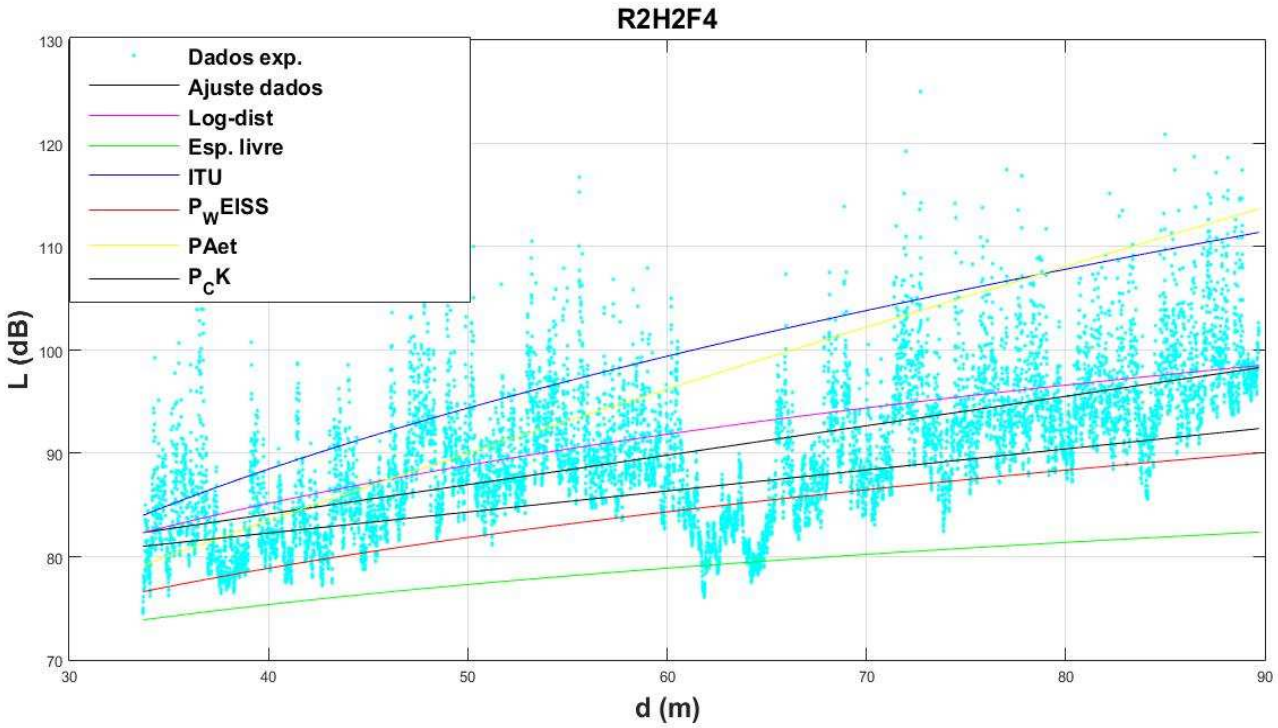


Figura 5.10 – Gráfico da Perda calculada e modelos teóricos x Distância-R2H2F4.

Através de uma análise gráfica, podemos identificar que:

Para rota 1, o modelo que mais se aproximou dos dados medidos foi o Log-*distance*, cujo parâmetro "N"foi calculado a partir dos dados medidos, seguido do *Early* ITU.

Para rota 2, o modelo *Log-distance* ficou melhor, porém seguido do modelo Chen & Kuo.

Através do *Matlab®*, foram obtidos o gráfico da potência média recebida em cada frequência usada, como mostra a Figura 5.11, paras as seguintes rotas: R1H1, R1H2, R2H1, R2H2.Fazendo uma análise desse gráfico verifica-se que:

- Na rota 1, para ambas as alturas de TX, há pouca variação até 3000 MHz. A partir daí a variação foi maior, sendo pior para Htx2.
- Na rota 2, ocorre algo semelhante, mas entre 1500 e 2000 MHz e a partir de 3000 MHz, percebe-se maior diferença, sendo pior para Htx2.

Em ambas as rotas, então, a Htx2 dá maior perda, explicado pela passagem do sinal pelas copas das árvores, onde existe a tendência que o sinal sofra maior atenuação, devido à absorção, e maior espalhamento pela folhagem.

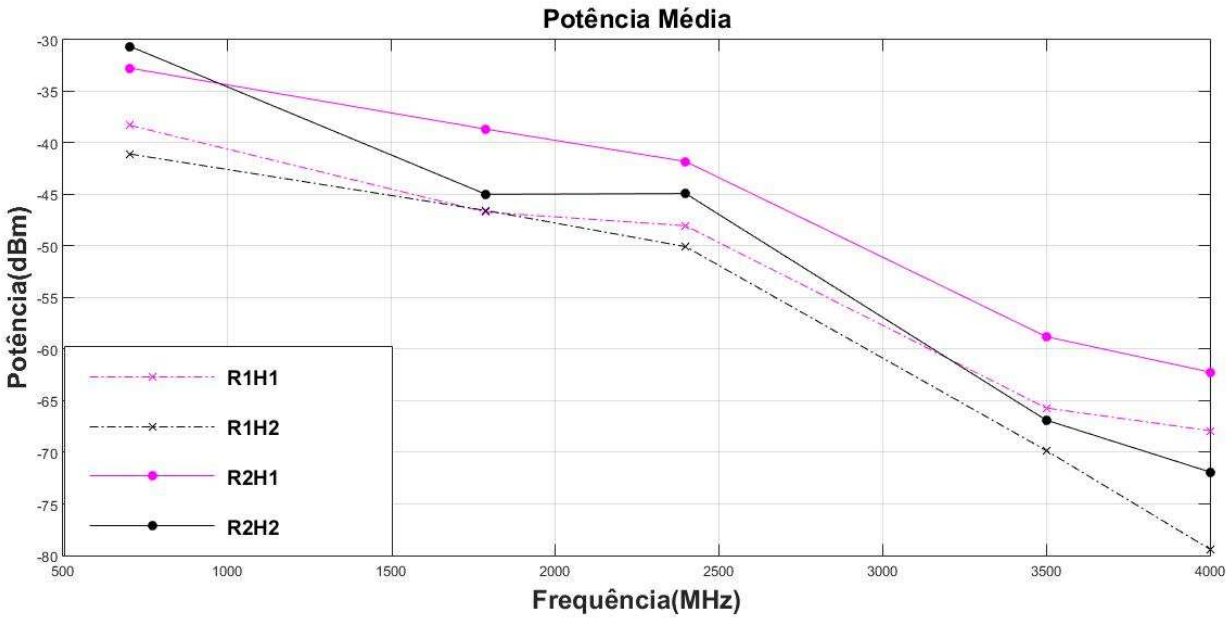


Figura 5.11– Potencia média X Frequência (em cada Rota/Altura Tx).

Ao analisarmos graficamente a perda média (dB) em cada rota para cada frequência, na Figura 5.12, verificamos que para a mesma Htx, a perda cresce com a frequência em ambas as rotas R1 e R2, e caiu com aumento altura da antena.

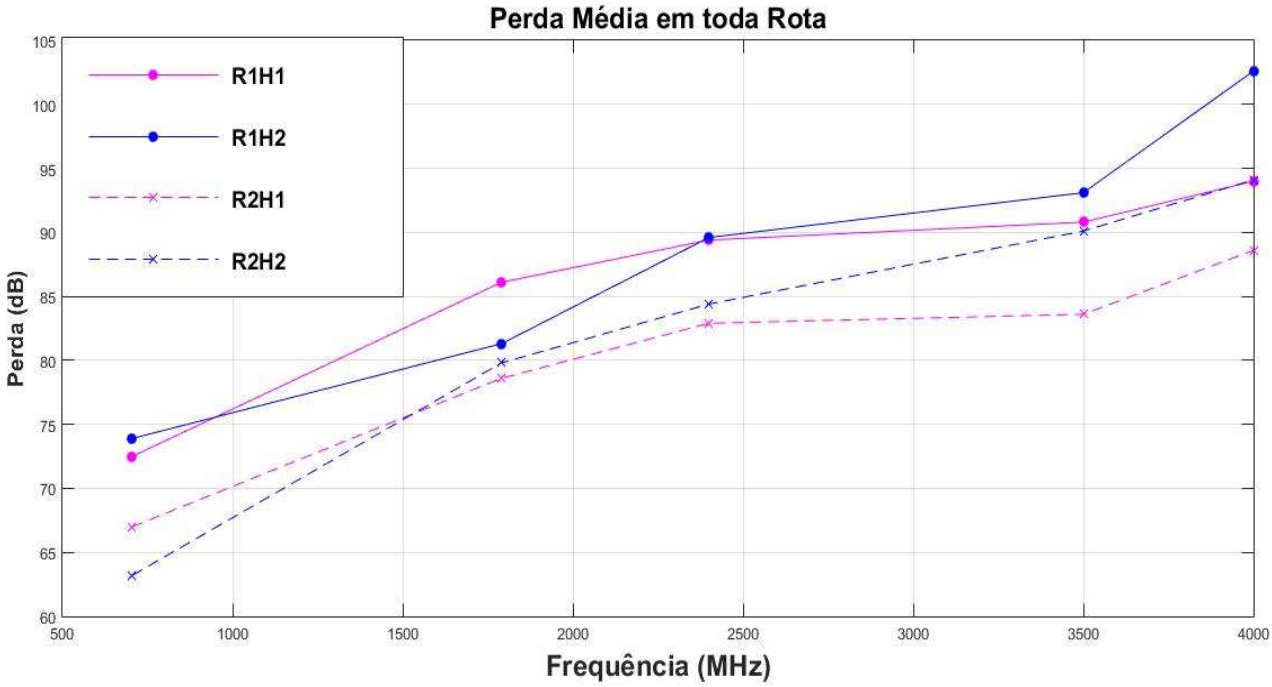


Figura 5.12 – Gráfico da Perda Média X Frequência (em cada Rota/Altura).

6. MODELO PROPOSTO E SUA ANÁLISE

6.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo, será abordado procedimento para elaboração do modelo proposto e sua análise, comparando a curva de perda do modelo proposto com a *path loss* para o ambiente em questão e outros ambientes com as mesmas características. Como mencionado no capítulo 5, às rotas foram divididas em dois trechos, devido à diferença de ambiente ao longo do percurso, com isso, serão propostos dois modelos, um para cada trecho da rota.

6.2. DESENVOLVIMENTO DO MODELO

Através dos dados medidos, foi elaborado um modelo que tem como referência o modelo de predição *Log-Distance* e *Espaço Livre* e leva em consideração a variável: frequência de operação e a altura da antena transmissora. Será descrita metodologia utilizada na elaboração do modelo e realizada a sua comparação com os valores medidos.

Para elaboração do modelo e visando descrever a influência da vegetação no canal, as rotas 1 e 2, R1 e R2, foram divididas em duas partes: a primeira, praticamente comum às duas rotas, com alguma visada, e se estendendo até o centro da praça, para R1, e um pouco mais para R2, pois possui uma área mais aberta na metade do seu trecho; segunda, seria a parte até final de cada rota, onde ambas apresentam vegetação mais concentrada e obstruindo a visada entre TX e RX, porém na rota 1 a vegetação está mais densa, também ocorrendo do outro lado da rota, e com alturas entre 8 e 12 metros; para rota 2, há maior concentração de vegetação do lado esquerdo, não muito densa, e com alturas variando entre 5 e 7 metros.

A partir dos dados medidos, foram calculadas a perda média (dB) para cada trecho, em cada rota, para todas as frequências nas duas alturas Htx, conforme mostram as Tabela 6.1 e 6.2. Através do *Matlab*®foi levantada a curva de Perda versus Frequência nas situações: R1H1, R1H2, R2H1 e R2H2, mostradas na Figura 6.1 e 6.2.

Trecho 1		
PERDA NA ROTA 1		
Freq	Htx1(1,7m)	Htx2(4,2m)
705	65.33	72.5
1790	80.32	78.48
2400	89.03	87.9
3500	88.13	90.02
4000	91.29	96.71
PERDA NA ROTA 2		
Freq	Htx1(1,7m)	Htx2(4,2m)
705	65.68	60.22
1790	75.73	78.19
2400	80.67	83.06
3500	80.77	88.62
4000	86.83	94.31

Tabela 6.1 – Perda Média x Frequência –T1

Trecho 2		
PERDA NA ROTA 1(dB)		
Freq	Htx1(1,7m)	Htx2(4,2m)
705	80.05	77.72
1790	92.38	89.66
2400	93.94	96.15
3500	98.16	100.02
4000	101.51	108.22
PERDA NA ROTA 2 (dB)		
Freq	Htx1(1,7m)	Htx2(4,2m)
705	80.35	73.26
1790	89.66	86.15
2400	90.31	90.47
3500	92.88	97.65
4000	98.06	102.3

Tabela 6.2 – Perda Média x Frequência –T2

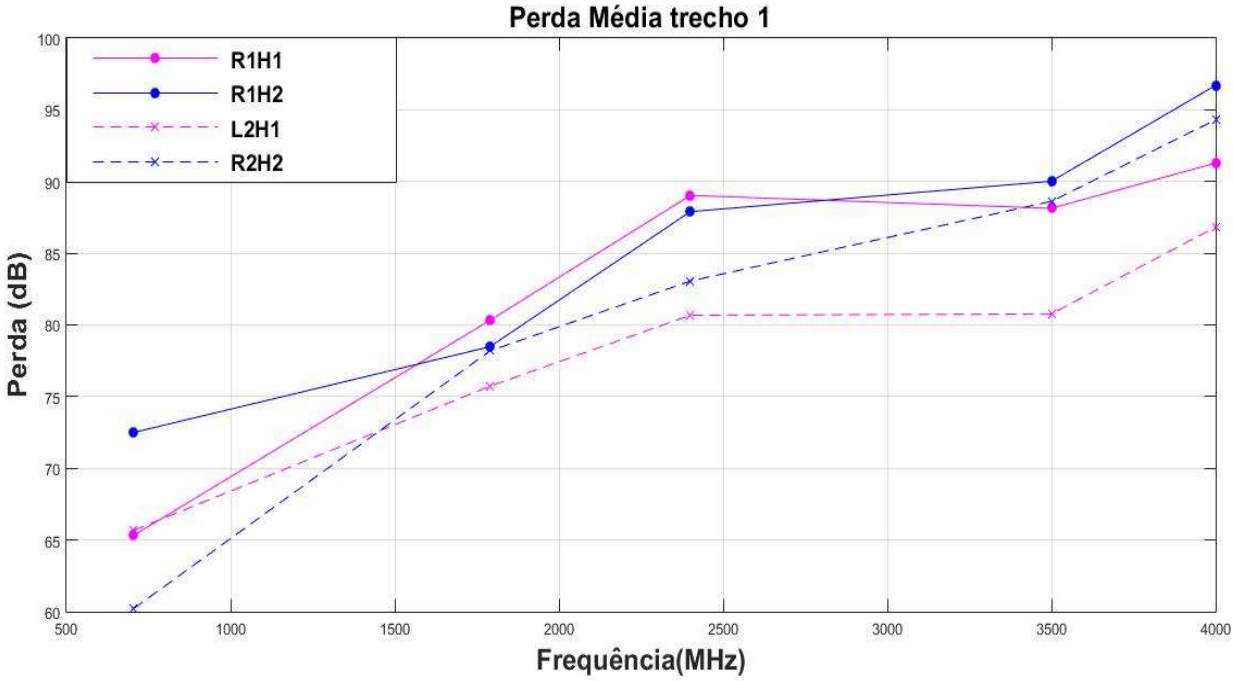


Figura 6.1 - Gráfico Perda média x Frequência – T1.

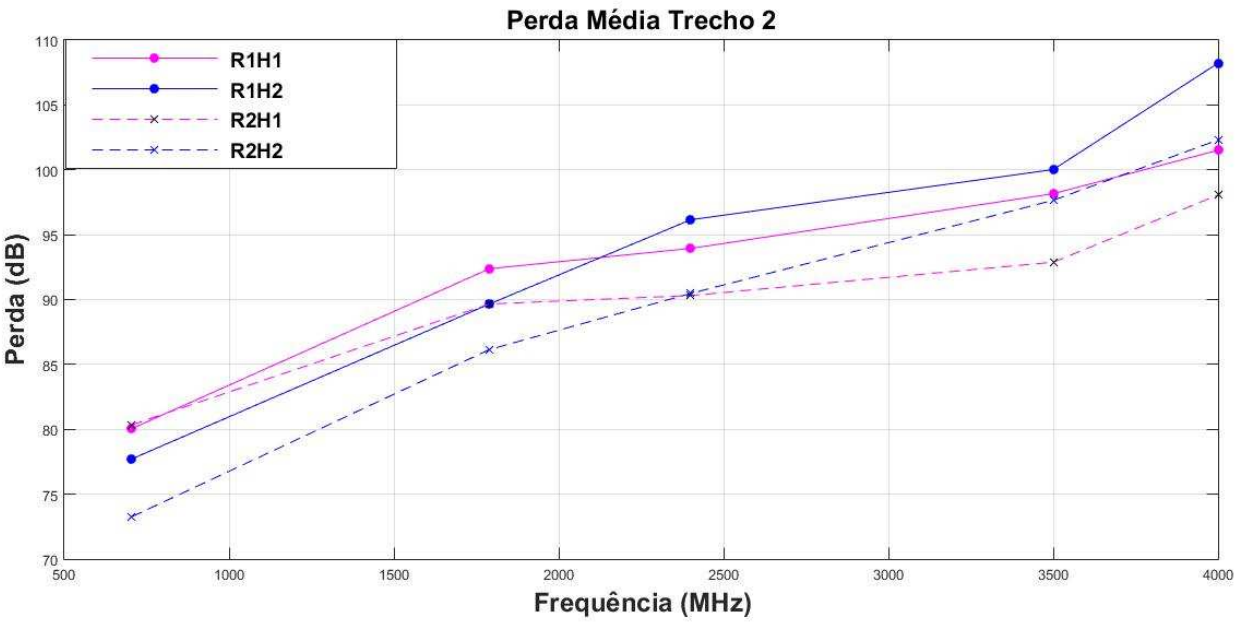


Figura 6.2 - Gráfico Perda média x Frequência – T2.

A partir desses dados, analisou-se o comportamento do valor médio da perda em 6 situações, levando em consideração alguns parâmetros como: frequência, altura da transmissão e condições de recepção, a fim de avaliar a sua influência na perda média. Em cada uma das situações analisadas, obteve-se a curva de ajuste para perda média, gerando outros 6 gráficos, mostrados nas Figuras 6.3 a 6.8, que serão analisados um a um, de forma a se extrair informações que venham a embasar o modelo que será proposto. Tais gráficos são da Perda Média (dB) x Frequência (MHz), em cada situação apresentada nos títulos de cada um dos gráficos.

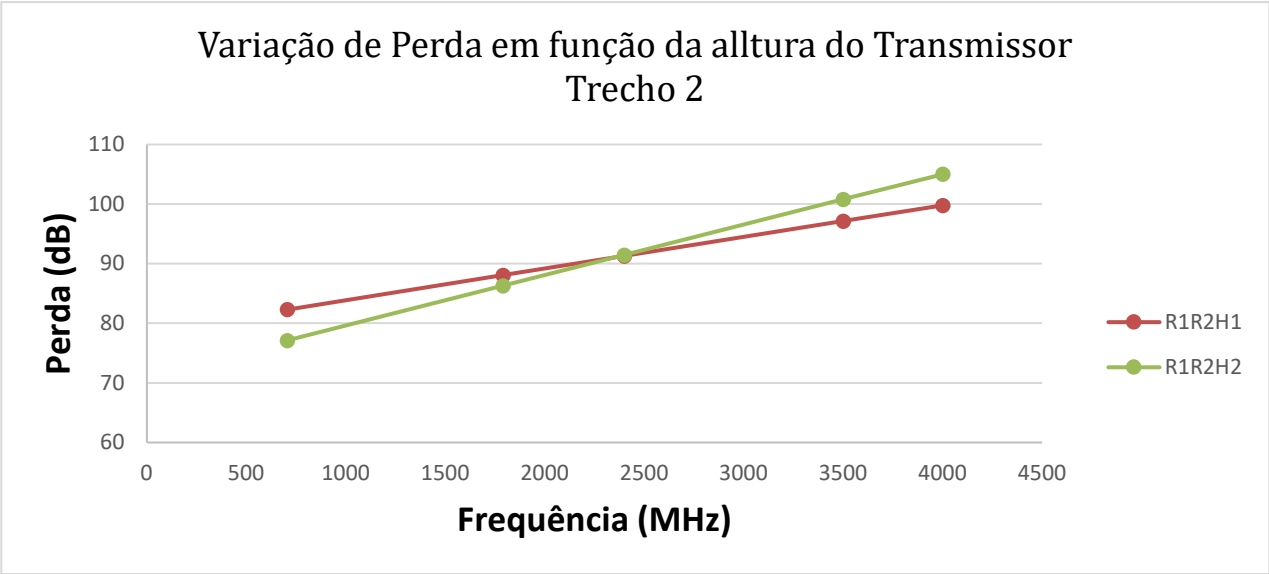


Figura 6.3 - Perda Média das duas rotas para cada altura de transmissão no trecho 2.

Para o gráfico apresentado na Figura 6.3, foi calculada a média da curva de ajuste R1H1 e R2H1 obtendo a curva R1R2H1 e de R1H2 e R2H2, obtendo a curva R1R2H2. Com isso, verificamos que até, aproximadamente, a frequência de 2400 MHz, tem-se maior perda para Htx1 e, a partir daí, temos maior perda para Htx2. Cabe ressaltar que foram licitadas pela Anatel as faixas de frequência que serão utilizadas para o serviço 5G, são elas: 700, 2300, 3500 e 5800 MHz, e três delas estão sendo aqui estudado com o efeito da vegetação na obstrução, logo, esse tipo de avaliação, é de grande importância para as empresas de telecomunicações, pois para as frequências abaixo de 2400, em locais com vegetação para os ambientes como parque urbano e praças, vemos que a perda é menor para altura de transmissão menor, quando não atinge a copa das árvores, onde apresentam mais folhas e galhos. Então, isso fará grande diferença no momento de escolher o local de instalação da antena de transmissão.

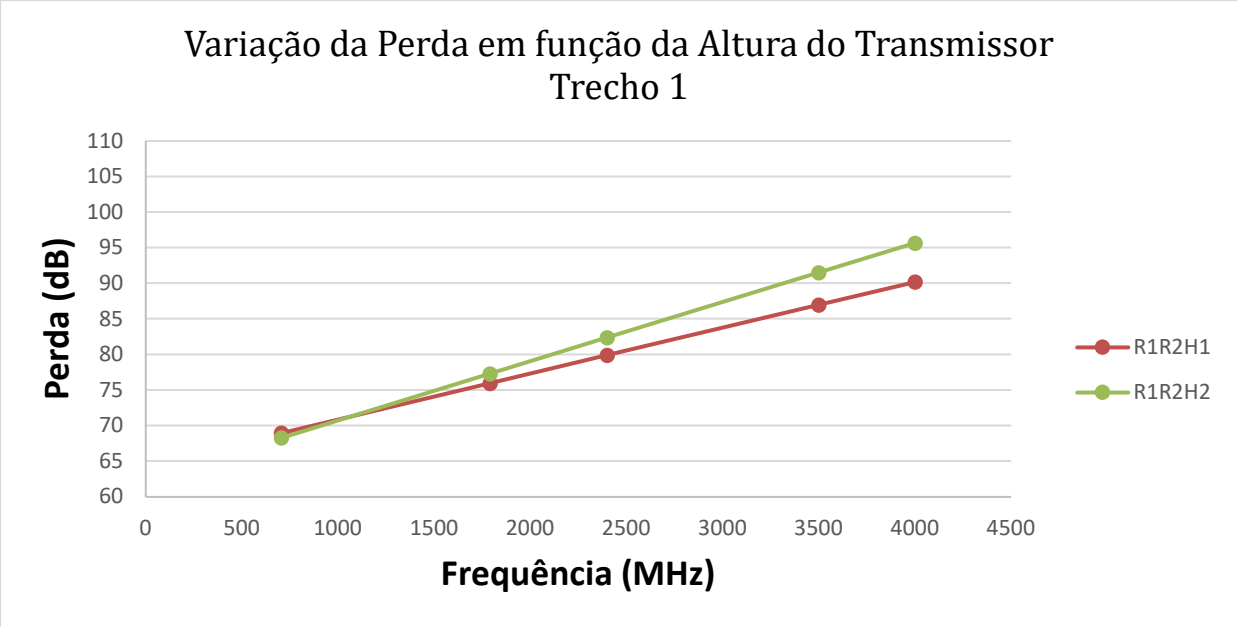


Figura 6.4 - Perda Média das duas rotas para cada altura de transmissão no trecho 1.

Seguindo a mesma metodologia, obtiveram-se as curvas R1R2H1 e R1R2H2, para o primeiro trecho das duas rotas para cada altura da transmissora. Nota-se que até 1200 MHz temos a perda média praticamente igual em ambas as alturas e que até 2400 MHz ela cresce muito pouco, comparando-se a altura 1 (Htx1) com a 2 (Htx2). A partir desta frequência, a diferença deperda média, de Htx2 para Htx1, quase que dobra conforme a frequência aumenta. Cabe salientar que nas duas análises acima estão em consideração a condição de recepção e altura de transmissão, pois levam em consideração a Htx e o trecho da rota.

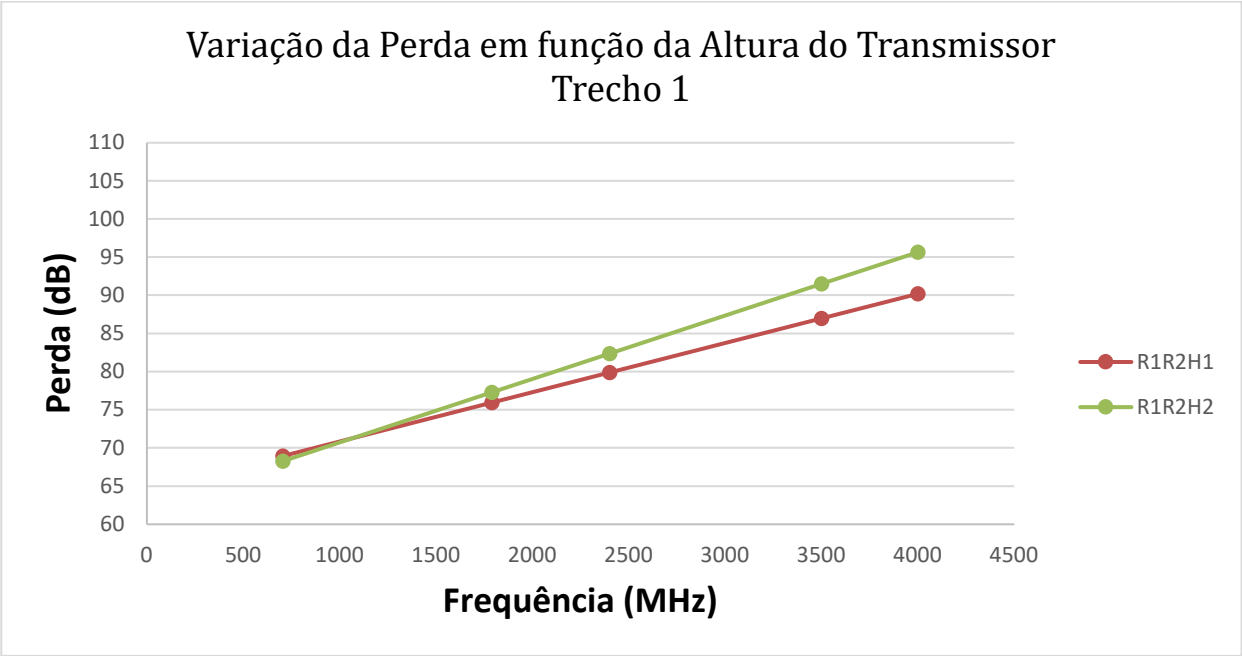


Figura 6.5 - Perda Média das duas rotas para Htx1 nos dois trechos.

Para obter o gráfico da figura 6.5, foi calculada a média das curvas de ajuste R1H1 e R2H1 no trecho 1, obtendo-se a curva R1R2H1 e de R1H1 e R2H1 no trecho 2, obtendo a curva R1R2H2. Com isso, verificamos que para mesma Htx1, temo maior perda para o segundo trecho, sendo praticamente constante a diferença em toda curva, num valor aproximado de 11 dB.

Para rota 1, verificamos na Figura 6.6 que o trecho 2 apresenta maior perda e que ela se mantém constante conforme a frequência aumenta, num valor aproximado de 10 dB. Fica claro que a condição de recepção com mais obstrução tem maior perda.

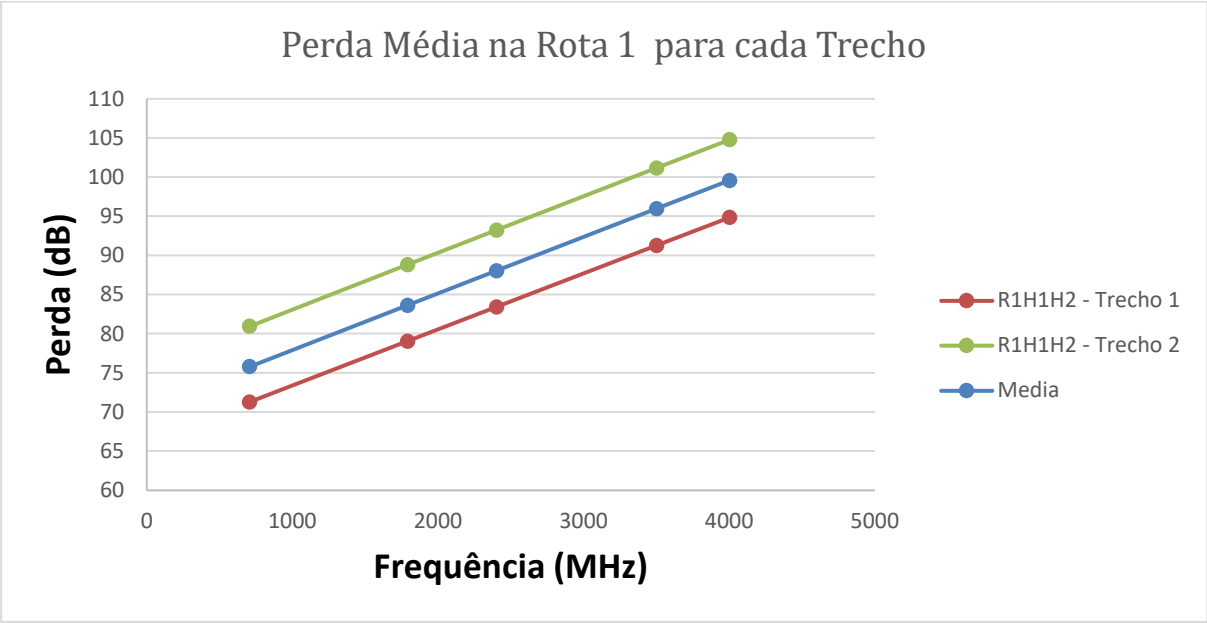


Figura 6.6 - Perda Média na rota 1 nos dois trechos.

Na Figura 6.7, para o trecho 1 com vegetação mais na lateral das rotas, tem-se maior perda na rota 1, praticamente constante em todas as frequências, de valor igual a 5 dB. Isso se deve ao fato de que o trecho 1 na rota 1 é mais extenso, tendo uma área maior de clareira.

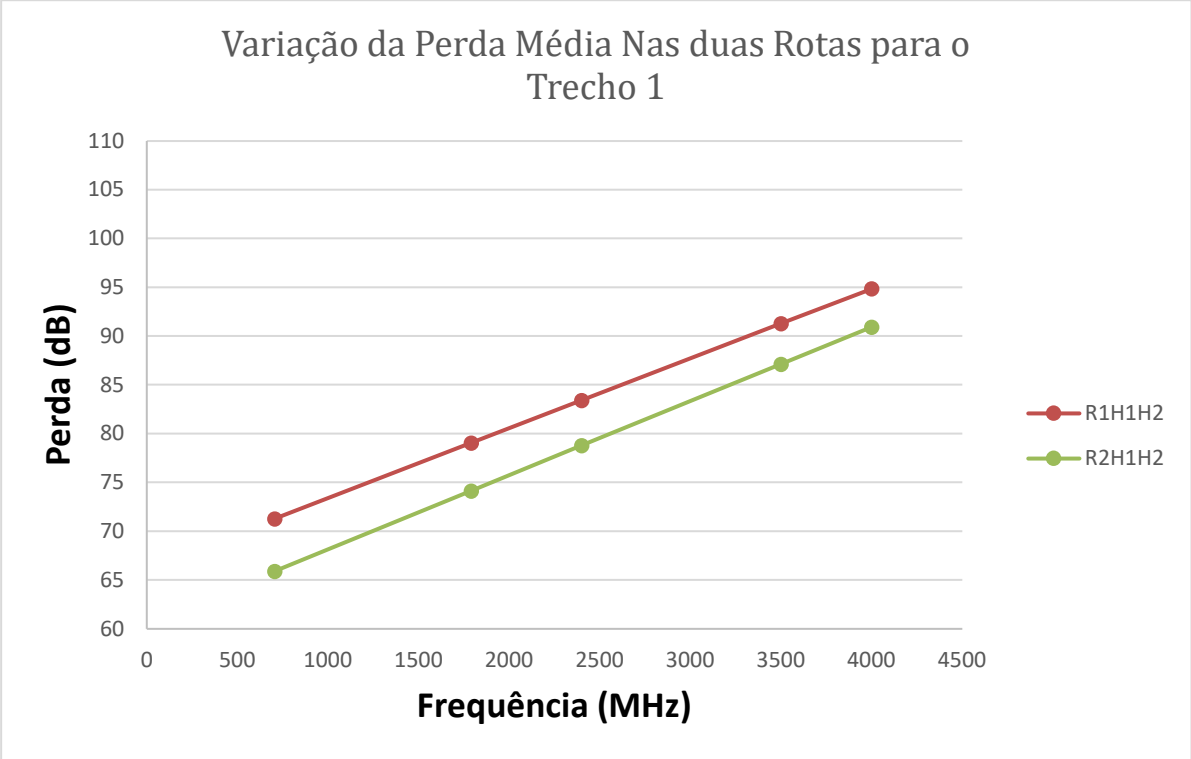


Figura 6.7 - Perda Média no trecho 1 em cada rota.

Para o trecho 2, com mais vegetação obstruindo o receptor, tem-se maior perda na rota 1, indo de 3 a 5 dB na faixa de 700-4000 MHz, como mostra a Figura 6.8. Isso se deve ao fato de que no trecho 2 da rota 1 há vegetação mais densa e as árvores estão mais próximas.

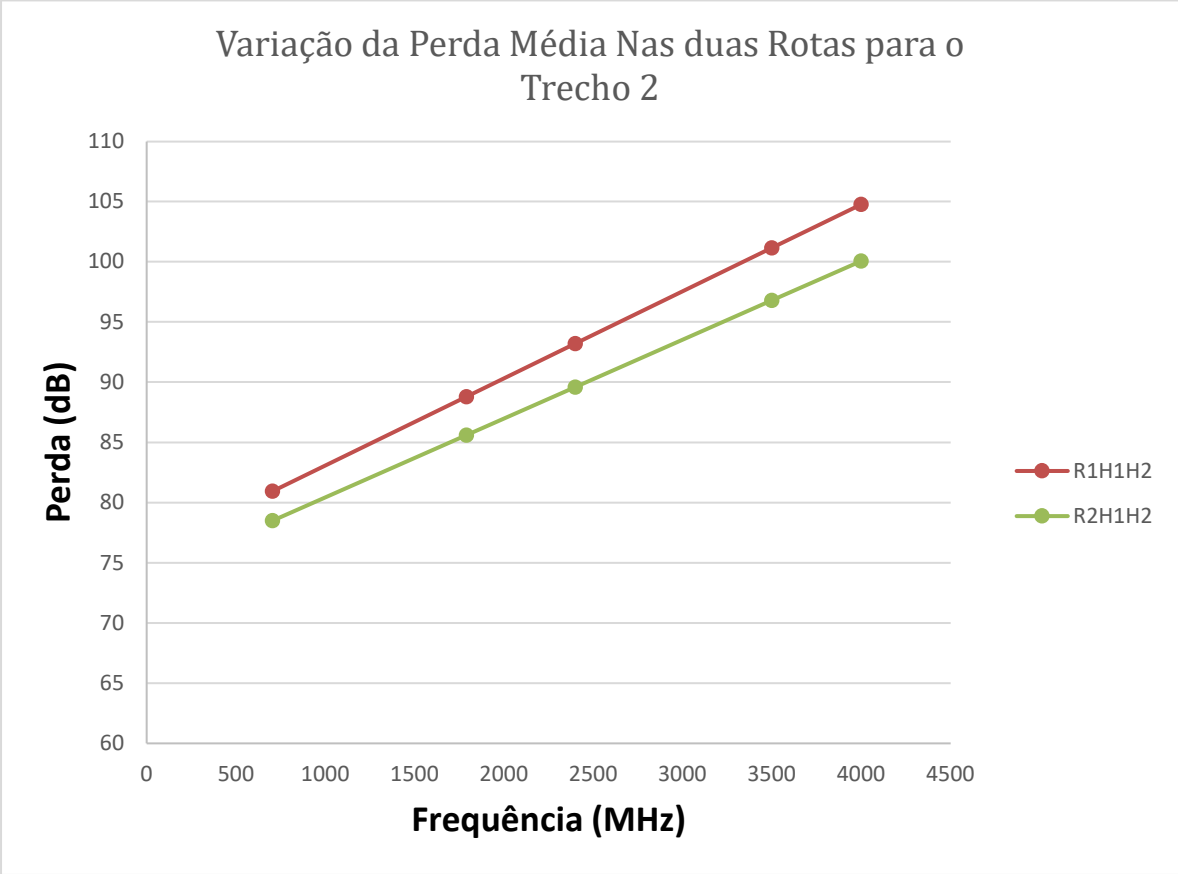


Figura 6.8 - Perda Média no trecho 2 em cada rota.

Para o trecho 2, com mais vegetação obstruindo o receptor, temos maior perda na rota 1, indo de 3 a 5 dB na faixa de 700 – 4000 MHz. Isso se deve ao fato de que no trecho 2da rota 1 temos uma vegetação mais densa e as árvores estão mais próximas.

Nas análises feitas das Figuras 6.3 a 6.8, vemos que a perda média tem um comportamento semelhante nas diversas situações analisadas. Então, após essas análises e com objetivo de representar a influência da altura da transmissora e frequência na perda devido à vegetação, obteve-se o valor médio das 4 rotas, nas 5 frequências, para o trecho 1 e para o trecho 2. Em seguida, através da ferramenta *cftool*do *matlab*®, foram obtidas as retas de melhor ajuste, para cada trecho, e plotados seus gráficos, Figura 6.9, obtendo-se as seguintes expressões:

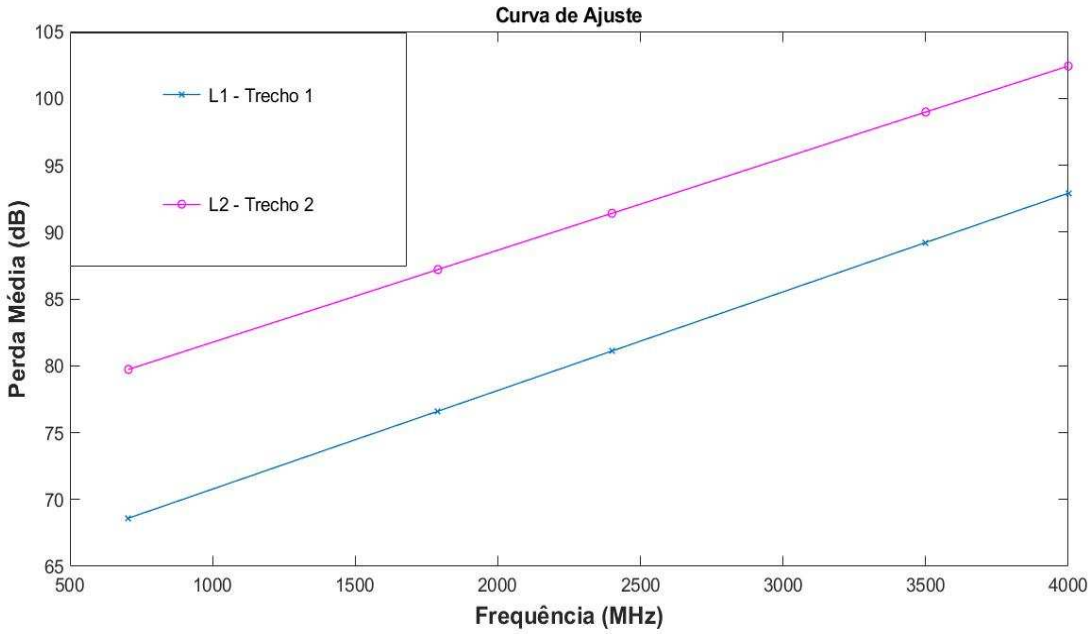


Figura 6.9 – Perda x Frequência (L1 e L2).

$$L1 = 0{,}007376f + 63{,}4 \text{ (dB)}, \text{ trecho 1;} \quad (6.1)$$

$$L2 = 0{,}006886f + 74{,}87 \text{ (dB)}, \text{ trecho 2.} \quad (6.2)$$

onde L1 e L2 são a perda, em dB, devido ao ambiente, considerando a vegetação com o espaço livre e f é a frequência, em MHz.

Não é possível obter um termo em função da altura de transmissão para compor as equações acima, pois as medições foram feitas somente em duas alturas, tornando inconclusiva sua avaliação a partir de dois pontos, pois não traduziriam com veracidade a influência da Htx no nível no sinal, contudo, como os valores que levaram a esses modelos são as médias em cada rota, nas 5 frequências e duas alturas, essa equação que varia com a frequência, também traz, implicitamente, a influência da altura da transmissora no nível de sinal. .

Tendo o modelo Log-*distance* como referência e de posse das equações 6.1 e 6.2, foram projetados dois modelos de predição de perda para o ambiente em questão, nesta dissertação, conforme descritos abaixo:

$$1°)\ LD1 = 10.N.log\left(\frac{d}{d_0}\right) + \mathrm{L1} \tag{6.3}$$

$$2°)\ LD2 = 10.N.log\left(\frac{d}{d_0}\right) + \mathrm{L2} \tag{6.4}$$

onde LD1 e LD2 são perda, em dB, e N é o coeficiente de perda para o ambiente, calculado através dos dados obtidos das medidas.

Nota-se que o termo L(d0) do modelo log-*distance* não aparece no modelo proposto. Isso se deve ao fato de que esse termo é um valor próximo ao valor de perda no espaço livre, numa dada frequência e distância, e como LD1 e LD2 foram obtidos em um ambiente onde se tinha a vegetação e espaço livre influenciando o canal, o termo numérico que acompanha o modelo representa, em média, a perda no espaço livre.

Para análise que será apresentada a seguir, foi utilizado o coeficiente calculado para cada trecho, tanto para o modelo proposto, quanto para *log-distance*. São apresentados alguns gráficos, Figuras 6.10 a 6.17, com os modelos propostos e com os modelos teóricos, verificando o que melhor se ajustou aos dados medidos. Os gráficos para as demais rotas serão apresentados no Apêndice D.

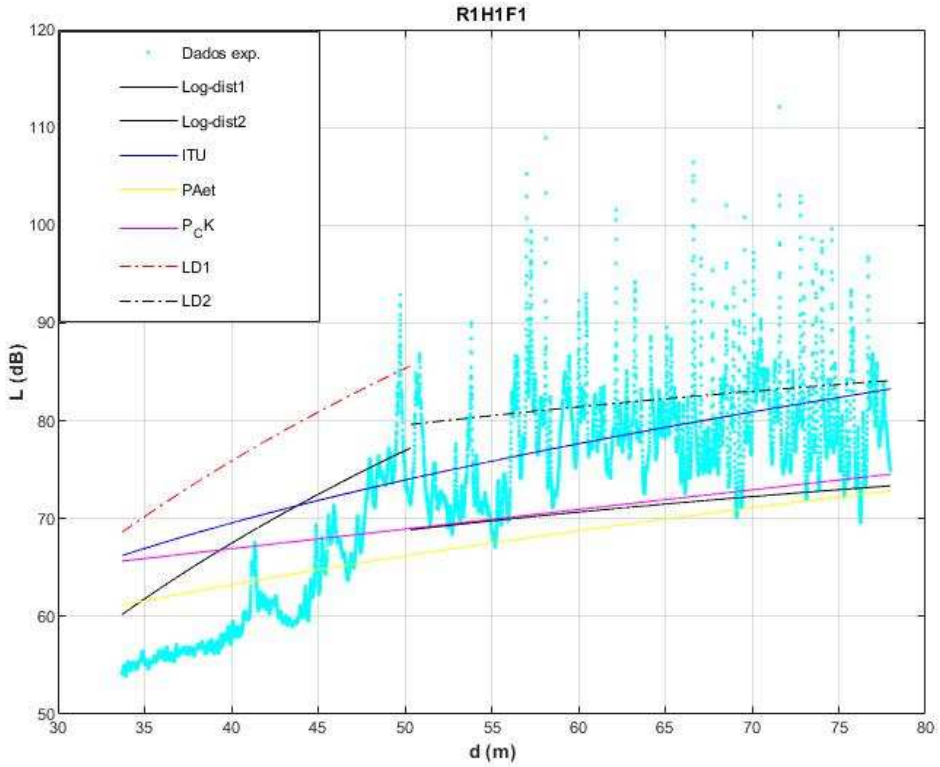


Figura 6.10– Perda x Distância (R1H1F1).

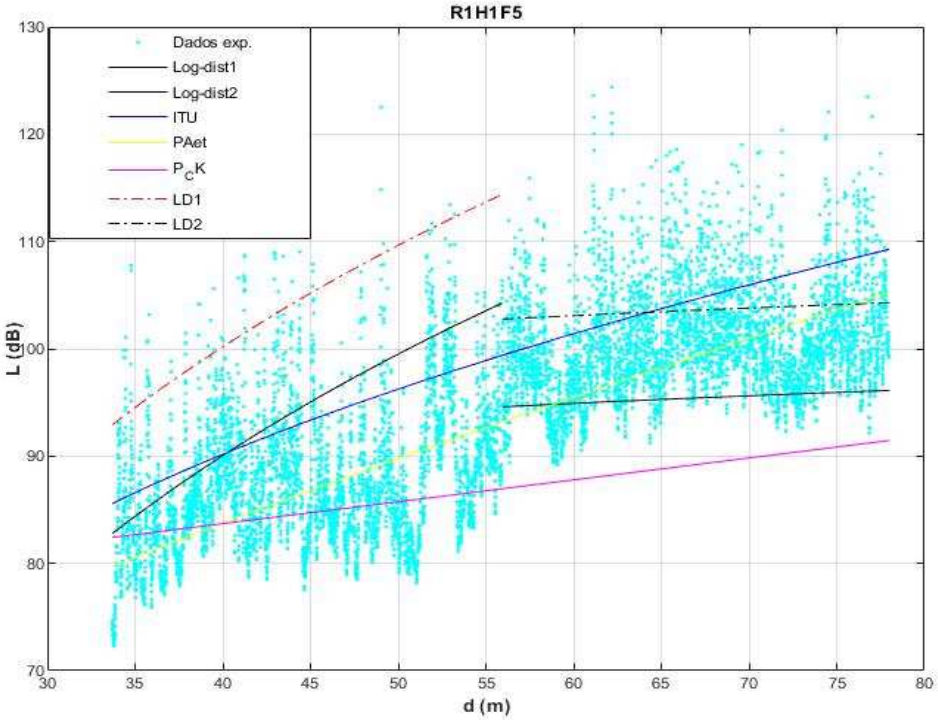


Figura 6.11– Perda x Distância (R1H1F5).

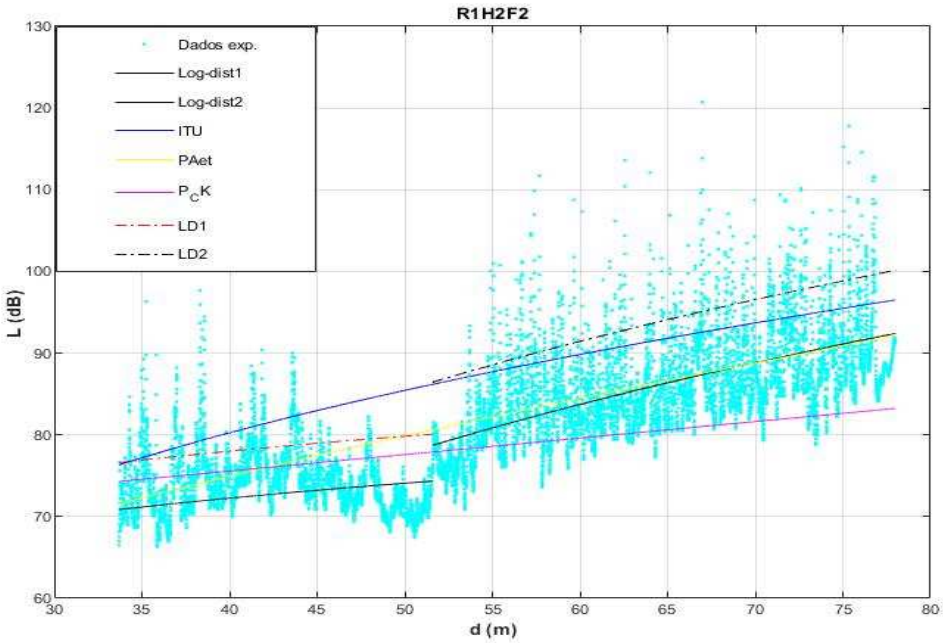


Figura 6.12– Perda x Distância (R1H2F2).

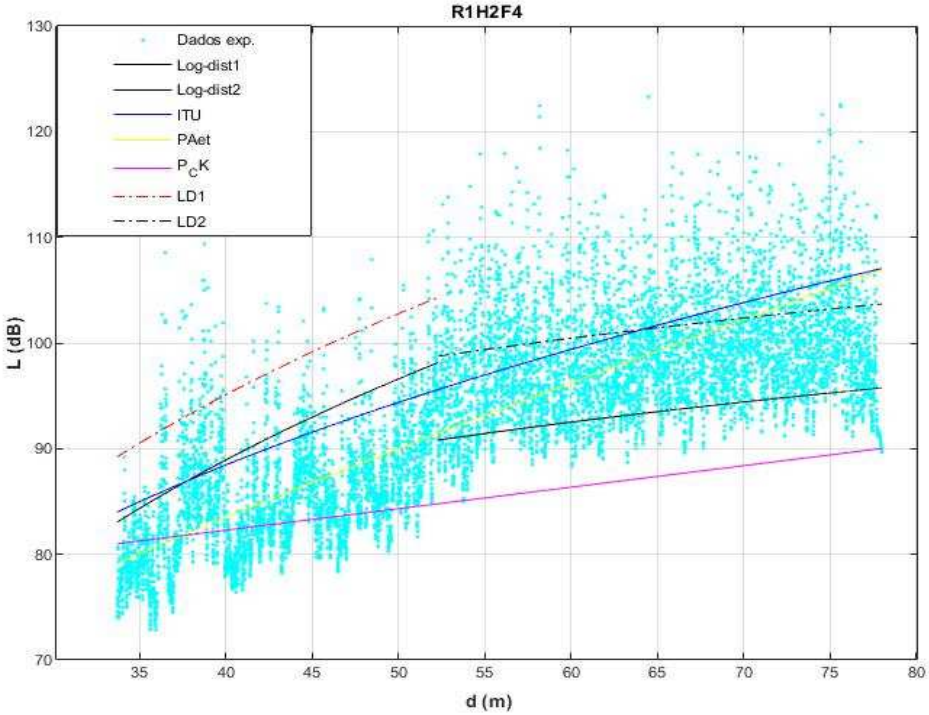


Figura 6.13– Perda x Distância (R1H2F4).

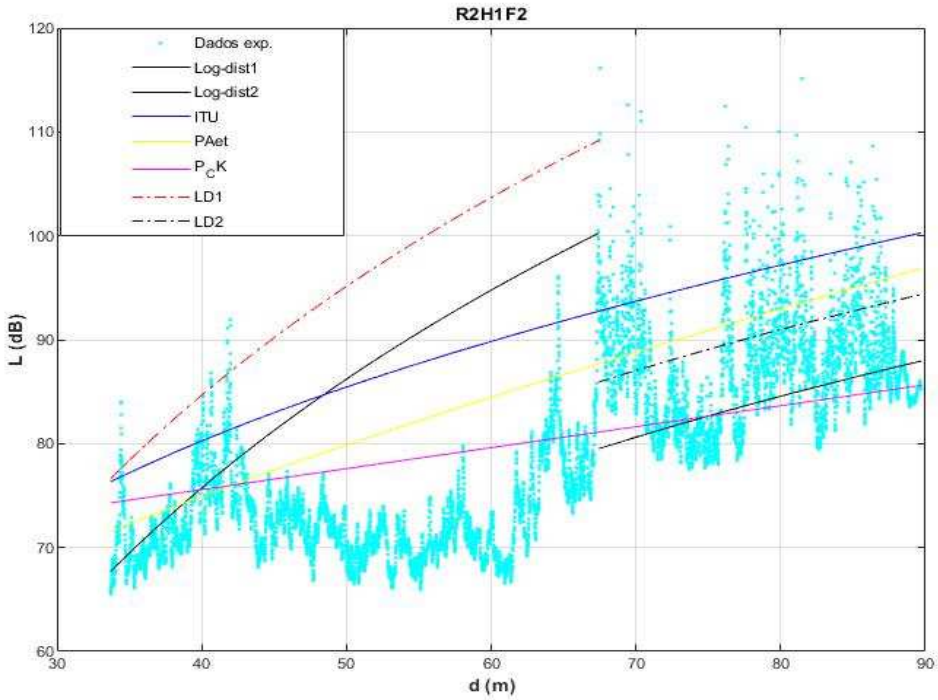


Figura 6.14– Perda x Distância (R2H1F2).

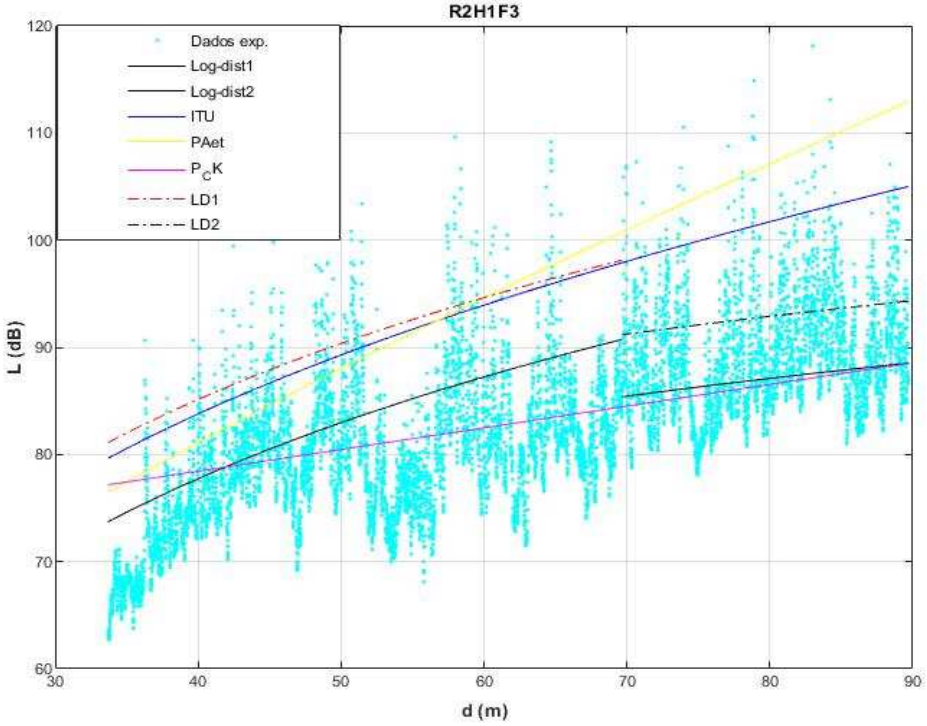


Figura 6.15–Perda x Distância (R2H1F3).

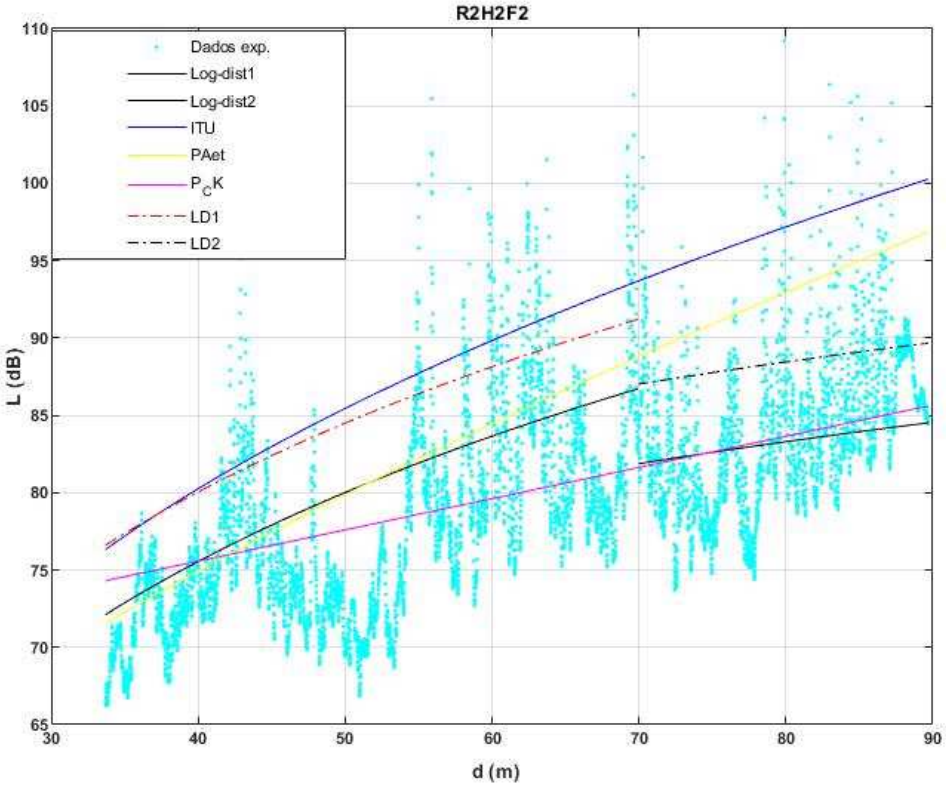


Figura 6.16– Perda x Distância (R2H2F2).

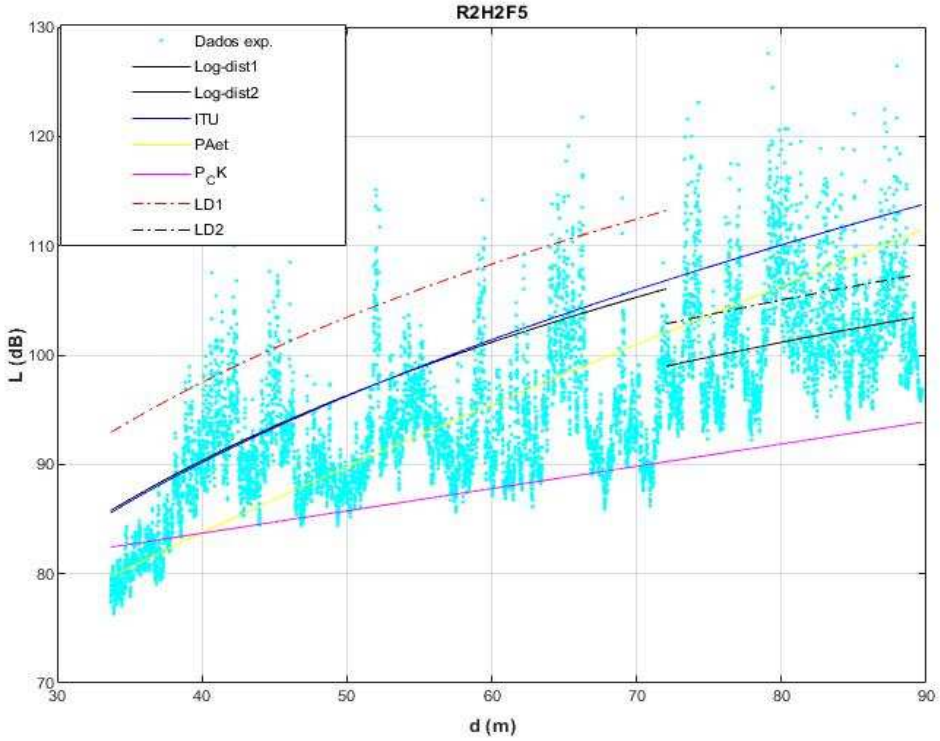


Figura 6.17– Perda x Distância (R2H1F5).

Ao analisarmos os gráficos, percebemos que os modelos que mais se ajustaram para o trecho 1 foram: o modelo da Recomendação ITU-R P. 833-2, na rota R1H1, o modelo Chen and Kuo, nas rotas R2H1 e R2H2, o modelo *Early* ITU, na rota R2H1.

Para o trecho 2, os melhores ajustes foram: Log-*distance*, nas rotas R2H1 e R2H2, e o modelo LD2, nas rotas R1H1 e R1H2. Com isso, verificou-se que não é possível modelar o canal como um ambiente único.

Para a rota 1, a partir de 50 metros, para rota 2, a partir de 65 metros, verificamos que os modelos propostos se ajustam melhor aos dados medidos.

Analisando as tabelas, do erro RMS entre a perda do novo modelo e a perda média experimental, obtido através do *Matlab*® nos dois trechos de cada rota, para cada altura de transmissão, ratificamos a análise gráfica feita anteriormente.

RMS - ROTA 1										
Htx	***1,7 metros***									
Trecho	***Trecho 1***					***Trecho 2***				
Freq(MHz)	***705***	***1790***	***2400***	***3500***	***4000***	***705***	***1790***	***2400***	***3500***	***4000***
Early ITU	45,00	**25,80**	**15,80**	38,30	**17,33**	**14,50**	**16,60**	23,60	25,13	**21,50**
Rec. ITU	**18,00**	**20,50**	**18,80**	**13,10**	20,80	54,00	30,80	35,90	**20,60**	**15,70**
CeK	31,00	29,40	42,30	**15,20**	**4,02**	37,70	75,50	53,90	61,60	76,70
LogDist.	**29,00**	35,70	40,30	29,70	33,09	41,10	36,60	**20,80**	27,20	25,90
LD1	122,90	55,50	24,60	150,00	155,00					
LD2						**20,12**	**16,40**	**14,70**	**20,30**	**17,10**
Htx	***4,2 metros***									
Trecho	***Trecho 1***					***Trecho 2***				
Freq(MHz)	***705***	***1790***	***2400***	***3500***	***4000***	***705***	***1790***	***2400***	***3500***	***4000***
Early ITU	**14,30**	39,90	22,30	24,30	**22,80**	**15,80**	29,60	16,90	20,40	25,00
Rec. ITU	29,60	**14,90**	25,20	**12,30**	68,40	37,90	**14,10**	26,00	**19,30**	61,20
CeK	**18,20**	19,80	32,60	**16,30**	97,10	25,10	31,20	59,80	78,30	193,00
LogDist.	30,10	**10,42**	**21,60**	30,40	**30,00**	**16,20**	**13,90**	**13,30**	28,18	**18,50**
LD1	35,40	17,60	**20,60**	25,60	32,60					
LD2						21,00	43,60	**13,20**	**17,90**	**17,30**

Tabela 6.3 – Raiz do erro médio quadrático entre perda média experimental e dos modelos, para a Rota 1.

RMS - ROTA 2										
Htx	***1,7 metros***									
Trecho	***1***					***2***				
Freq(MHz)	***705***	***1790***	***2400***	***3500***	***4000***	***705***	***1790***	***2400***	***3500***	***4000***
Early ITU	**27,10**	94,70	70,30	109,00	151,80	51,60	59,70	91,00	151,00	105,00
Rec. ITU	**13,50**	**21,60**	68,70	52,00	108,00	**18,20**	30,40	173,00	162,00	63,00
CeK	30,10	**21,80**	**18,50**	**18,60**	**31,00**	**16,07**	24,30	**18,00**	**16,80**	**24,00**
LogDist.	271,00	129,00	**29,90**	**28,00**	**60,60**	29,20	**23,50**	**16,80**	**22,00**	**16,20**
LD1	197,00	284,00	80,00	175,00	248,00					
LD2						26,20	**21,80**	20,70	54,00	50,00
Htx	***4,2 metros***									
Trecho	***1***					***2***				
Freq(MHz)	***705***	***1790***	***2400***	***3500***	***4000***	***705***	***1790***	***2400***	***3500***	***4000***
Early ITU	131,00	49,20	49,90	56,70	32,90	72,80	95,30	92,00	83,00	46,20
Rec. ITU	**36,80**	18,20	52,60	38,90	**19,40**	**12,20**	49,20	175,00	89,70	25,20
CeK	62,40	**14,20**	**13,80**	**18,80**	**29,10**	**14,10**	**10,90**	**18,60**	29,80	70,30
LogDist.	**6,56**	**17,00**	**19,60**	**21,00**	31,50	16,70	**11,60**	**15,00**	**16,11**	**16,20**
LD1	172,00	40,00	33,70	63,30	95,80					
LD2						45,00	20,60	27,00	**21,00**	**19,50**

Tabela 6.4 – Raiz do erro médio quadrático entre perda média experimental e dos modelos, para a Rota 2.

7. CONCLUSÕES

O objetivo desta dissertação era a elaboração de um modelo de propagação para um ambiente com vegetação, típico de parques urbanos e praças, ou seja, um ambiente no qual a vegetação é predominante, porém, também são encontradas áreas de clareiras, pequenas construções, trânsito de pedestres.

Através de medições realizadas na Praça Nilo Peçanha, estudou-se a cobertura de sinal rádio móvel em ambiente misto, onde tínhamos trechos obstruídos por vegetação mais densa e menos densa e trechos com linha de visada. O sistema de transmissão era fixo e ficou localizado na entrada da UFF- Campus Praia Vermelha e o sistema de recepção era móvel, montado em cima de um carrinho, que se deslocou a uma velocidade média de 1,5m/s, próxima a de um pedestre. Com os dados dessas medições, foi possível obter os níveis de potência recebida com distância percorrida, extraindo-se a variabilidade em grande escala (*fading lento)* aplicando a metodologia de setorização. Em seguida, foi obtida a curva de ajuste (*path loss*) para cada um dos dois trechos em que foram divididas as rotas, tomando-se o eixo de distâncias normalizado para o valor inicial na rota, definido por d0, em escala logarítmica, o coeficiente de perda "N" com a distância é calculado para cada trecho de rota.

Ao analisar os resultados encontrados, notou-se que a perda média de propagação foi, de forma geral, coerente com a teoria nas diversas literaturas existentes, pois nas situações em que o ambiente tinha mais vegetação como obstáculo e a frequência era mais elevada, a perda aumentou de forma significativa.

Tendo como indicadores de desempenho as métricas: erro RMS de cada modelo, além de uma análise gráfica, o modelo Log-distância foi o que melhor se ajustou para a cobertura das rotas, sem segregação em trechos, entretanto, é um modelo que contém o coeficiente de perdas "N", obtido dos próprios dados medidos. O segundo modelo que melhor se aproximou dos dados coletados foi o *Early* ITU para rota 1 e Chen and Kuo para rota 2.

Fazendo análise das rotas, agora segregadas em dois trechos, para avaliar o modelo proposto, elaborados a partir dos dados em cada trecho das duas rotas, e comparar aos modelos teóricos, vemos que LD1, elaborado a partir dos dados do trecho 1,que tinha pouca obstrução e tendo linha de visada, não se ajustou bem ao ambiente, porém LD2, elaborado com os dados do trecho 2, com bastante vegetação obstruindo RX/TX, se ajustou bem para a rota 1 em seu trecho 2, isso devido ao fato desse trecho ter uma vegetação bem densa e em maior volume que esse mesmo trecho na rota 2.

A partir dos dados medidos, obteve-se a perda média em cada frequência paras as seguintes rotas: R1H1, R1H2, R2H1, R2H2, no trecho 1, e R1H1, R1H2, R2H1 e R2H2 para

o trecho 2. Com esses valores, foi gerada uma equação que representasse a perda média, em excesso, devido à vegetação, com influência da frequência e altura de transmissão. A equação encontrada para o modelo não trazia um termo referente à altura de transmissão, pois as medições foram realizadas somente em duas alturas de transmissão, sendo inconclusiva sua análise. Além disso, vale ressaltar que a influência da variação da altura da antena transmissora está implícita no termo encontrado, tendo em vista que este foi obtido através das médias encontradas nas duas rotas e alturas.

Na análise dos modelos propostos, foi verificado que estes se ajustaram melhor para o trecho 2 das duas rotas, que tinha mais vegetação como obstrução, e para o trecho inicial onde as vegetações eram mais laterais às rotas e o transmissor e o receptor estavam em linha de visada (*LOS*) e com vegetação lateral, os modelos ficaram distantes. Comparando os modelos propostos com os modelos existentes que melhor se ajustaram, nota-se que, de certa forma, para o trecho com vegetação, os modelos elaborados traduziram melhor o ambiente para o qual foram projetados, porém analisando o ambiente como misto, o modelo foi o que melhor se adequou.

Além disso, todas essas análises e avaliações para a faixa de 700-4000 MHz no ambiente em estudo são de grande valia para o momento atual, pois recentemente foram licitadas 4 faixas para o serviço RG, sendo elas 700, 2300, 3500 e 5800 MHz. Logo, esse tipo de análise contribui e serve de subsídio para uma empresa decidir aonde vai instalar uma antena, qual altura, qual frequência usar.

Na continuidade deste trabalho, para um aprimoramento dos modelos aqui propostos, sugerem-se para trabalhos futuros os seguintes tópicos:

- Realizar grande campanha de medições, incluindo maiores alturas de antena transmissora, de forma a se chegar a um modelo de cobertura em parques e praças arborizadas, estendendo a faixa de alturas de transmissora e de frequências, está até 6 GHz e;

- Realizar as medições em mais de um dia, sendo o primeiro como teste, possível de ser desconsiderado, a fim de averiguar as aferições e calibragem que forem feitas, em laboratório, nos equipamentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1]H. Bertoni, *Radio Propagation for Modern Wireless Systems,Prentice Hall,* 2000.

[2]ANDREWS, G.A.*; GHOSH,A.; MUHAMED, R. Fundamentals of WiMAX: Understanding Broadband Wireless Networking. Massachusetts: Prentice Hall,* 2007. ISBN 0-13-222552-2.

[3] T. S. Rappaport,"*Wireless Communications Principles and Practice", EUA, Prentice Hall, 2ndEdition,* 2002.

[4] B. S. L. Castro, "Modelo de Propagação para Redes sem Fio Fixas na Banda de 5,8 GHz em Cidades Típicas da Região Amazônica". Dissertação de Mestrado, UFPA, 2010.

[5] W.C.Y. Lee, Mobile Cellular Telecommunications Systems, McGraw-Hill, 1990

[6] T. S. Rappaport, "Comunicações sem fio - Princípios e práticas", 2nd ed. São Paulo, Brasil: Pearson Brasil, 2009.

[7] C. A. Balanis, Antenna Theory: Analysis and Design, John Wiley &Sons, 4th Ed., 1072 p., 2016.

[8] M. Hata, "*Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services,"IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. VT-29, no. 3, pp. 317–325, 1980.

[9] T. S. Rappaport; Wireless Communications: Principles and Practice,Prentice Hall, 1996.

[10] KRAUS, J.D. *Electromagnetics, 4th. Ed.. New York, McGraw-Hill*, 1992.

[11] MENDONÇA, L.A. DM Analise da Propagação de Ondas Eletromagnéticas em Canais com Desvanecimento, Inatel, Santa Rita de Sapucai,2002.

[12] RICE, S.O.*Statistical properties of a sine wave plus random noise. Bell System Tech. J., 27(1):109-157, Jan.,* 1948.

[13] YACOUB, M.D.*Foundations of mobile radio engineering, Boca Raton, CRC Press*, 1993.

[14]TSE, D.; VISWANATH, P.*Fundamentals of Wireless Communication. Cambridge: Cambridge University Press,* 2005. ISBN 978-0-521-84527-4.

[15] TSE, D.; VISWANATH, P. Fundamentals of Wireless Communication. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. ISBN 978-0-521-84527-4.

[16] ITU. Telecommunication / ICT statistics: Mobile cellular subscribers – 2007.[S.I.], 2007.

[17] PINHEIRO, R.; FARIA, J.L. WiMAX. 2008. Instituto Superior de Engenharia do Porto-IPPP.

[18] T. Okumura, E. Ohmori, and K. Fukuda, "*Field strenght and its variability in vhf anduhf land mobile services,"Review Electrical Communication Laboratory,* vol. 16, no.9-10,

pp. 825–873, 1968.

[19] Bertoni, H.L.; Walfisch, J. A Theoretical Model of UHF Propagation in Urban Environments, IEEE Trans. Antennas Propagat., december de 1988, Vol. 36, 12, pp.1788-1796.

[20]. J. C. Silva, G. L. Siqueira and P. V. G. Castellanos, "Propagation Model for Path Loss through Vegetated Environments at 700-800 MHz Band". *Journal of Microwaves, Optoelectronics, and Electromagnetic Applications*, vol. 17, N. 1, March 2018.

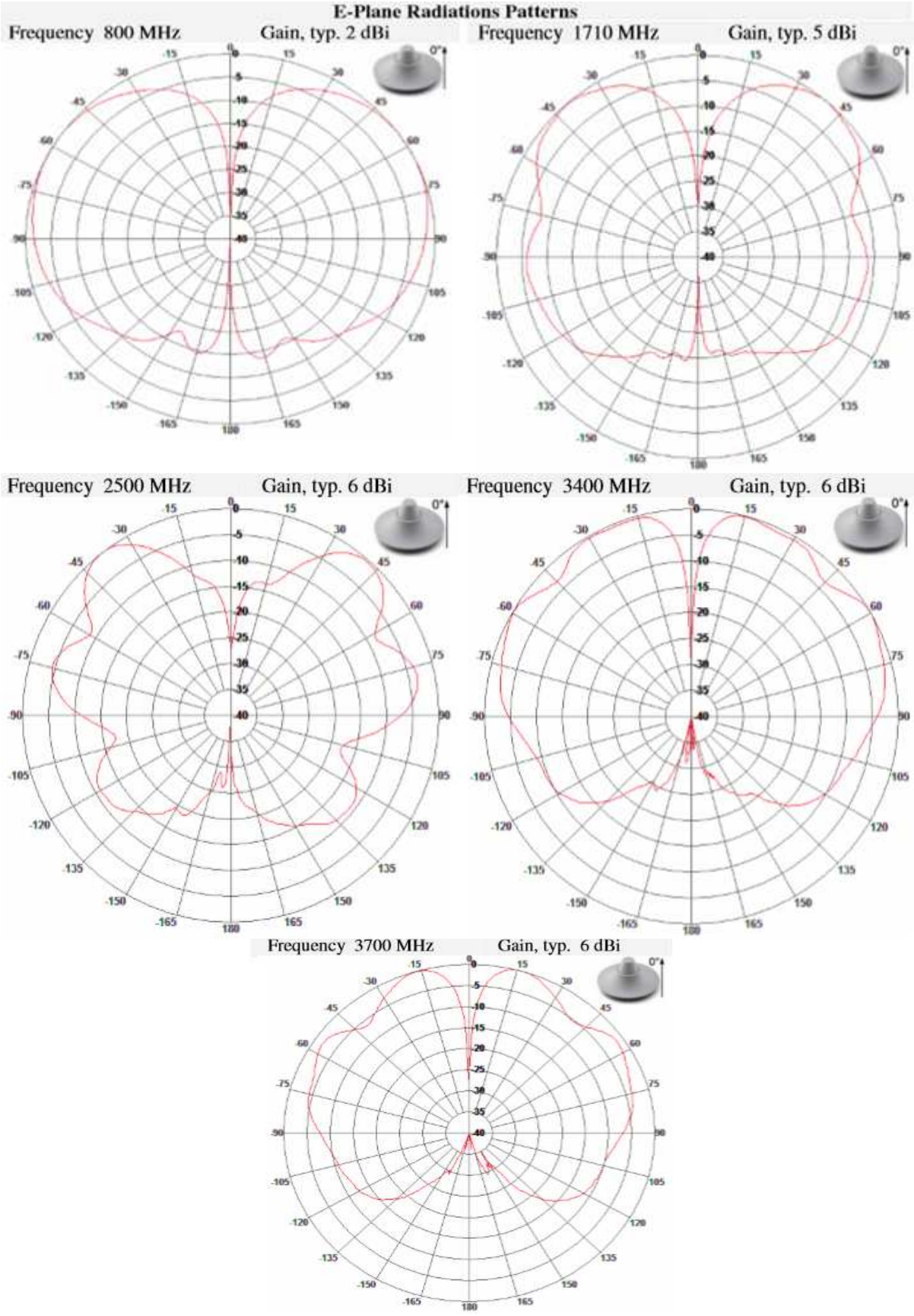
[21] Mark A Weissberger. An initial critical summary of models for predicting the attenuation of radio waves by trees. Technical report, ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY ANALYSIS CENTER ANNAPOLIS MD, 1982;

[22] H. Y. Chen, Y. Y. Kuo, "Calculation of radio Loss in Forest Environments by an Empirical Formula." Microwave and Optical Technology Letters, vol. 31, no 6, pp. 474-480, 2001.

[23] Urei, A.. *Erros in Estimating Local Average Power of Multipath Signals*. IEEE Eletronic Letters, vol. 27, no. 4, pp. 315-317,Fevereiro de 1991.

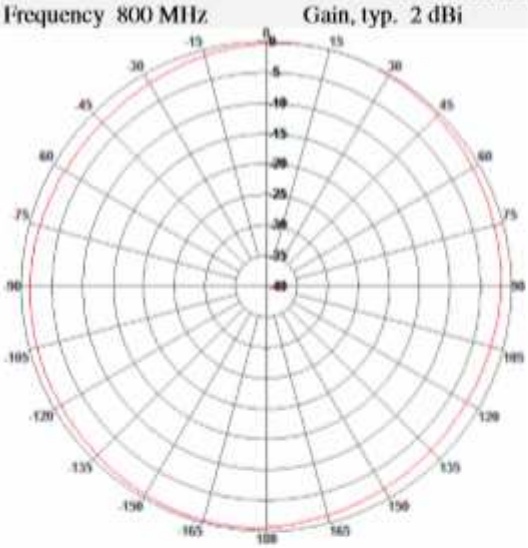
APÊNDICE A

DIAGRAMA DE IRRADIAÇÃO DA ANTENA DE RECEPÇÃO Multi Band Omni MA-CQ27-1X, 380 MHz - 6 GHz, MARS

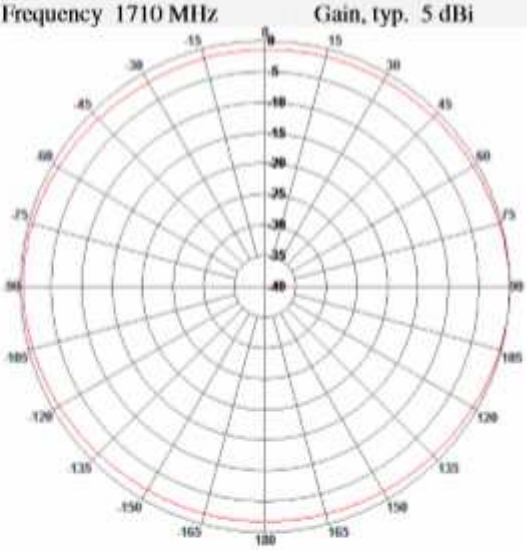


H-Plane Radiations Patterns

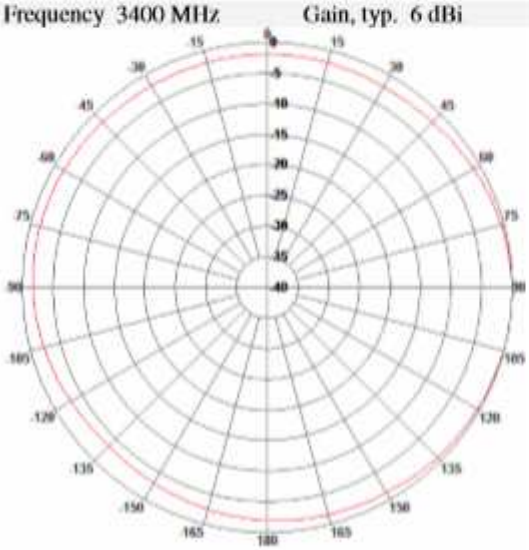
Frequency 800 MHz Gain, typ. 2 dBi



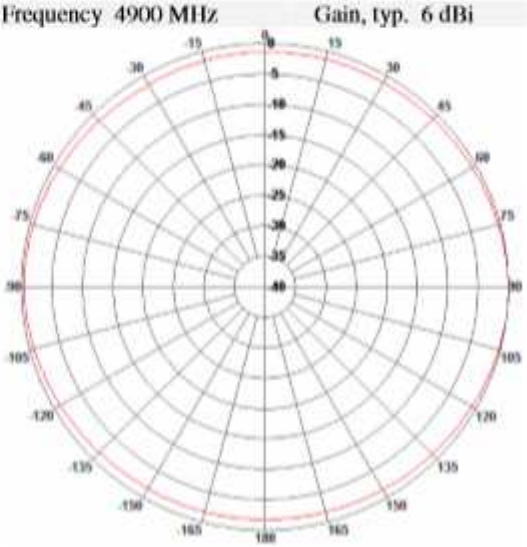
Frequency 1710 MHz Gain, typ. 5 dBi



Frequency 3400 MHz Gain, typ. 6 dBi

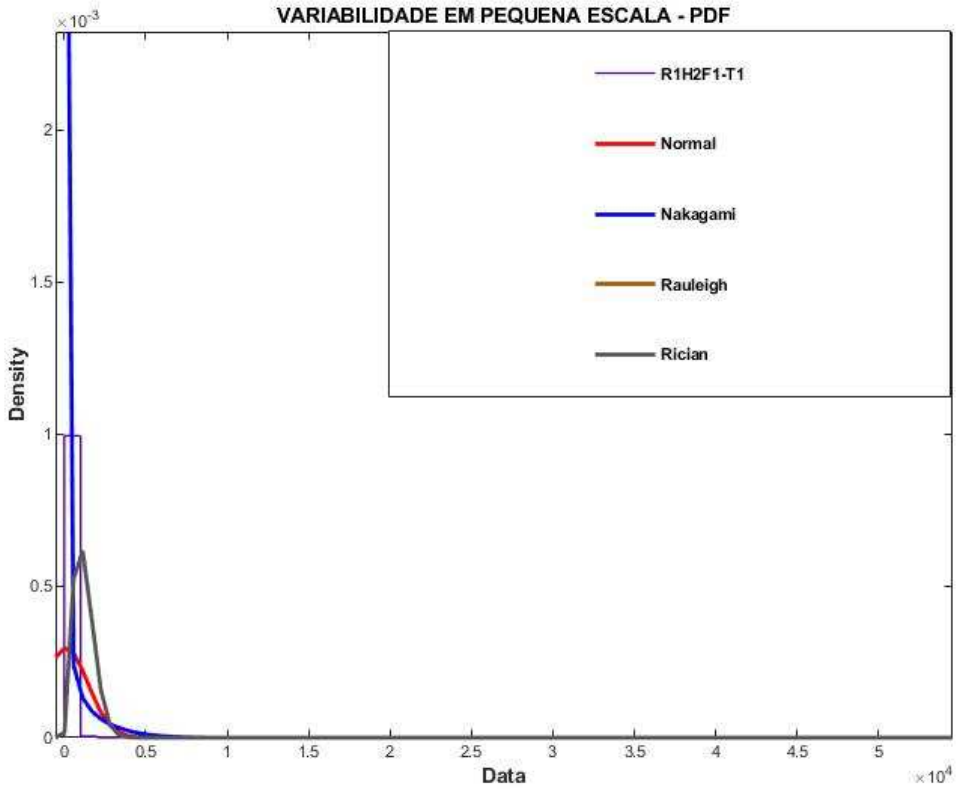


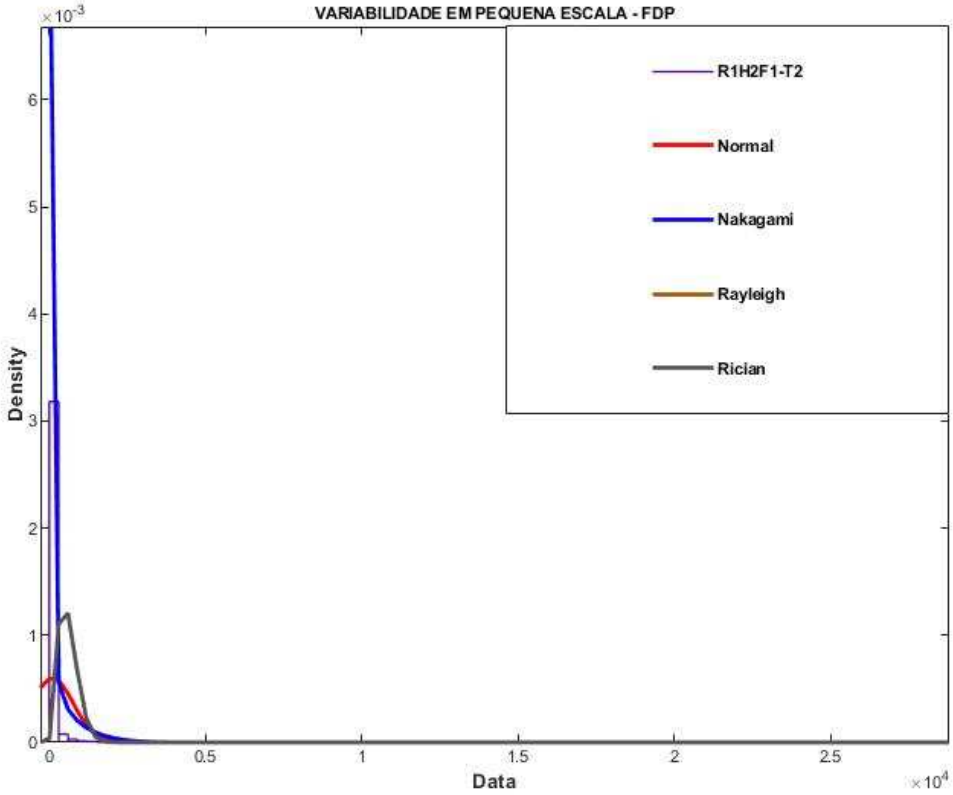
Frequency 4900 MHz Gain, typ. 6 dBi

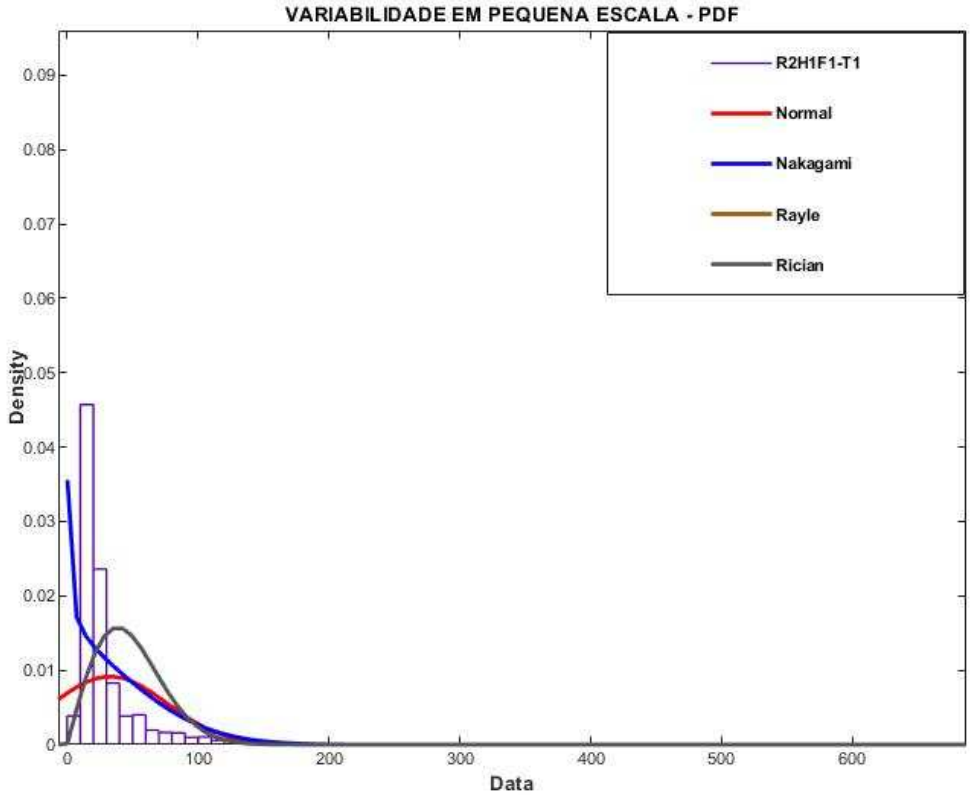


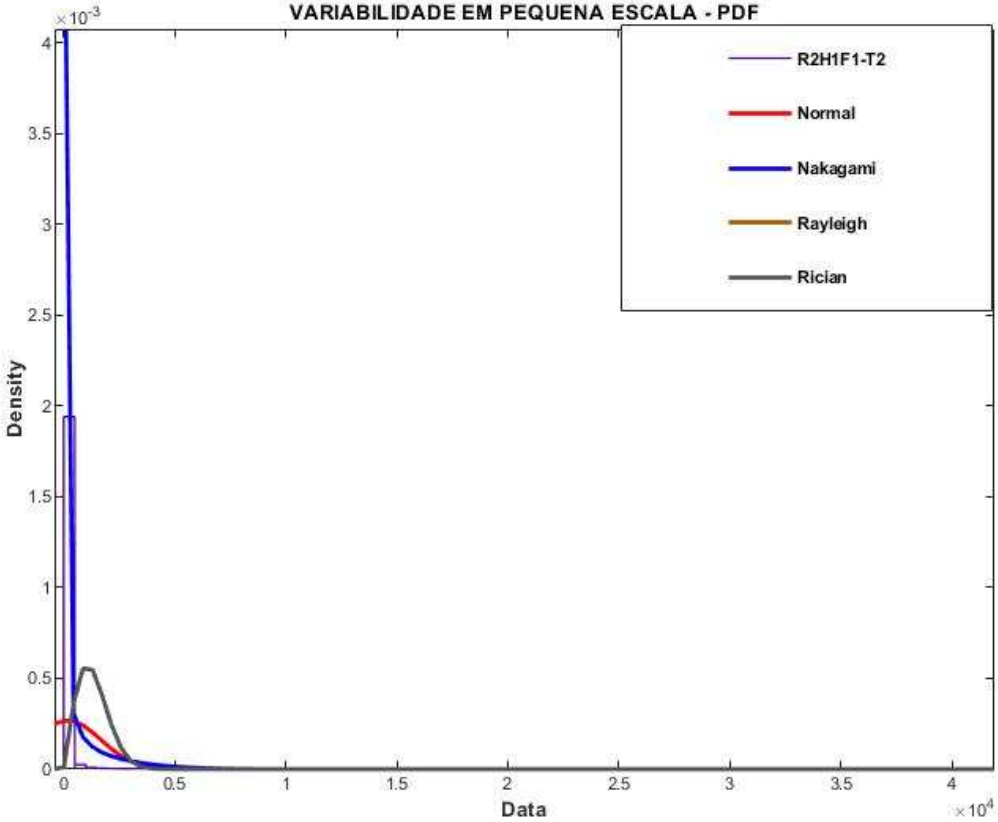
APÊNDICE B

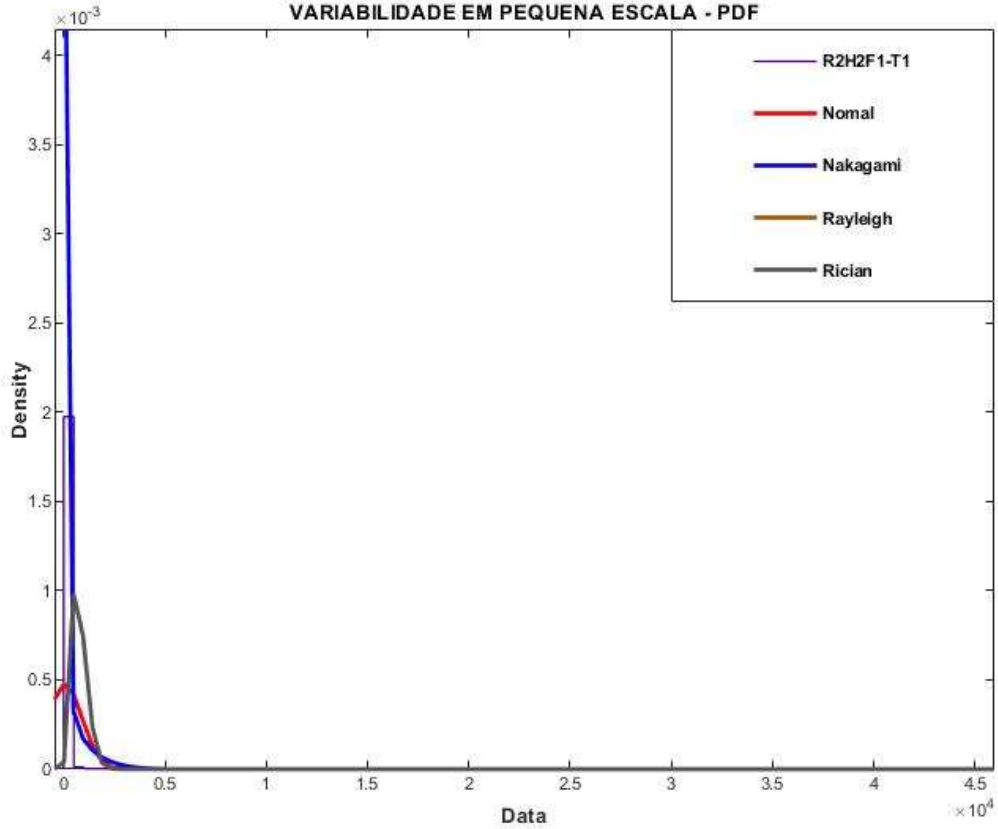
FUNÇÃO DENSIDADADE DE PROPABILIDADE (*PDF*) PARAARIABILIDADADE EM PEQUENA ESCALA NA FREQUENCIA DE 705 MHz NAS ROTAS R1H1, R1H2, R2H1, R2H2 NOS TRECHOS 1 E 2.

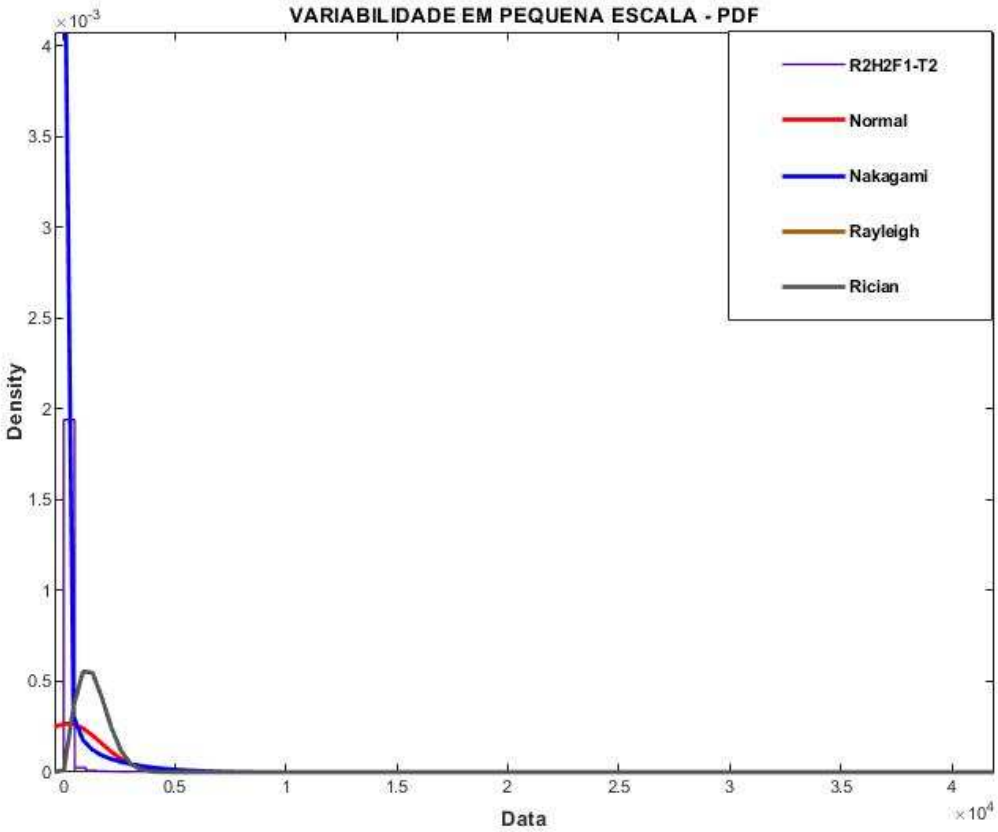



VARIABILIDADE EM PEQUENA ESCALA - FDP
R1H2F1-T2
Normal
Nakagami
Rayleigh
Rician
Density
Data
×10^-3
×10^4
0
1
2
3
4
5
6
0.5
1.5
2.5

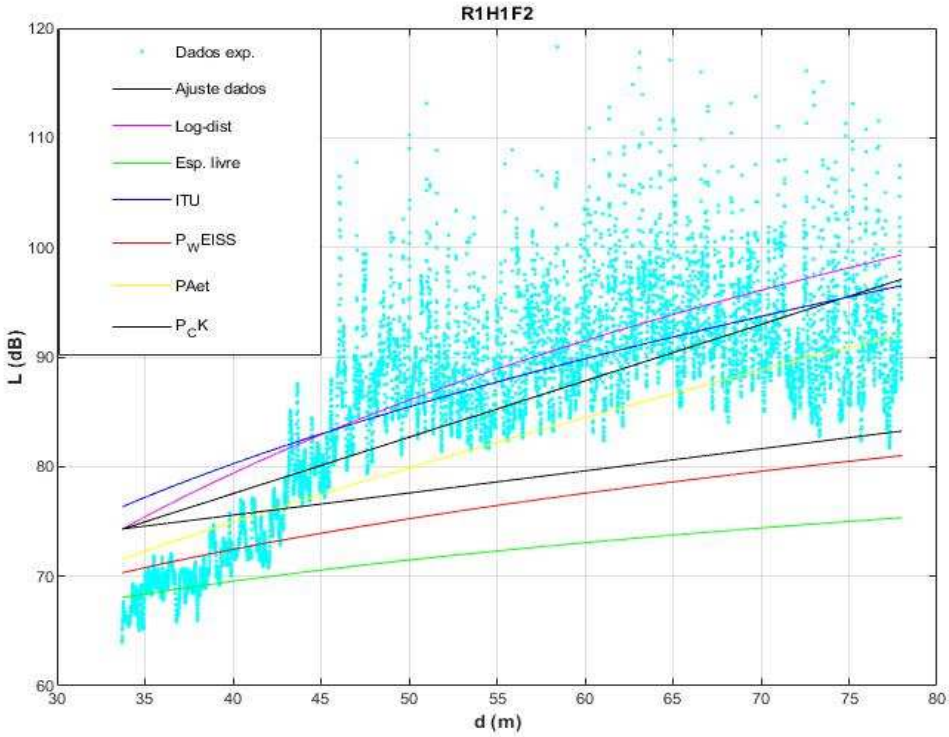

VARIABILIDADE EM PEQUENA ESCALA - PDF
R2H1F1-T1
Normal
Nakagami
Rayle
Rician
Density
Data
0
0.01
0.02
0.03
0.04
0.05
0.06
0.07
0.08
0.09
100
200
300
400
500
600

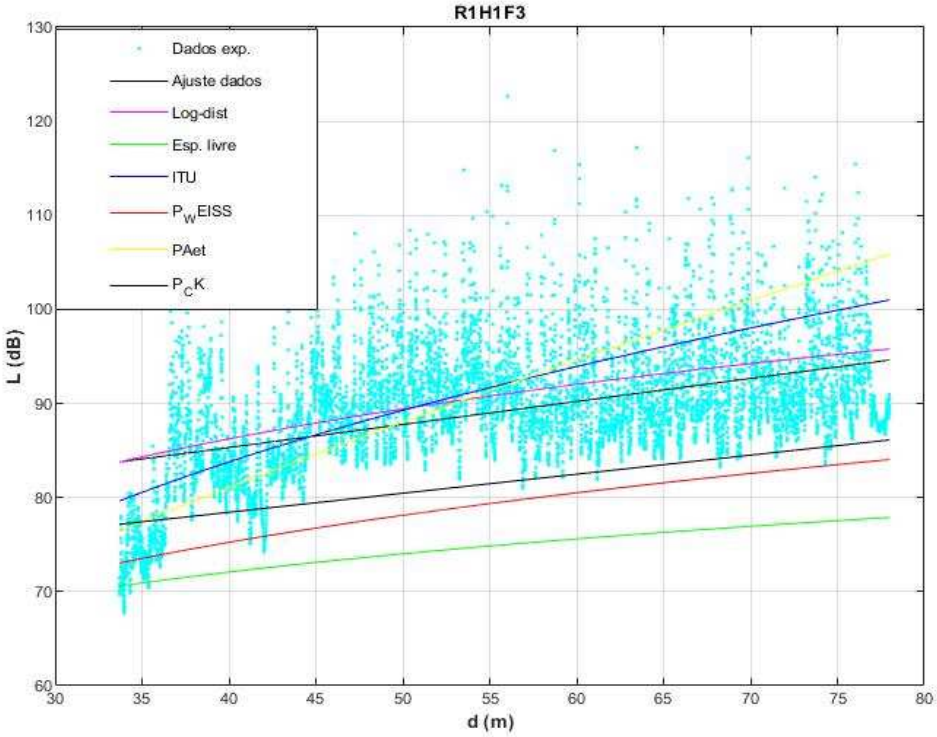

VARIABILIDADE EM PEQUENA ESCALA - PDF
R2H1F1-T2
Normal
Nakagami
Rayleigh
Rician
Density
Data
×10^-3
×10^4

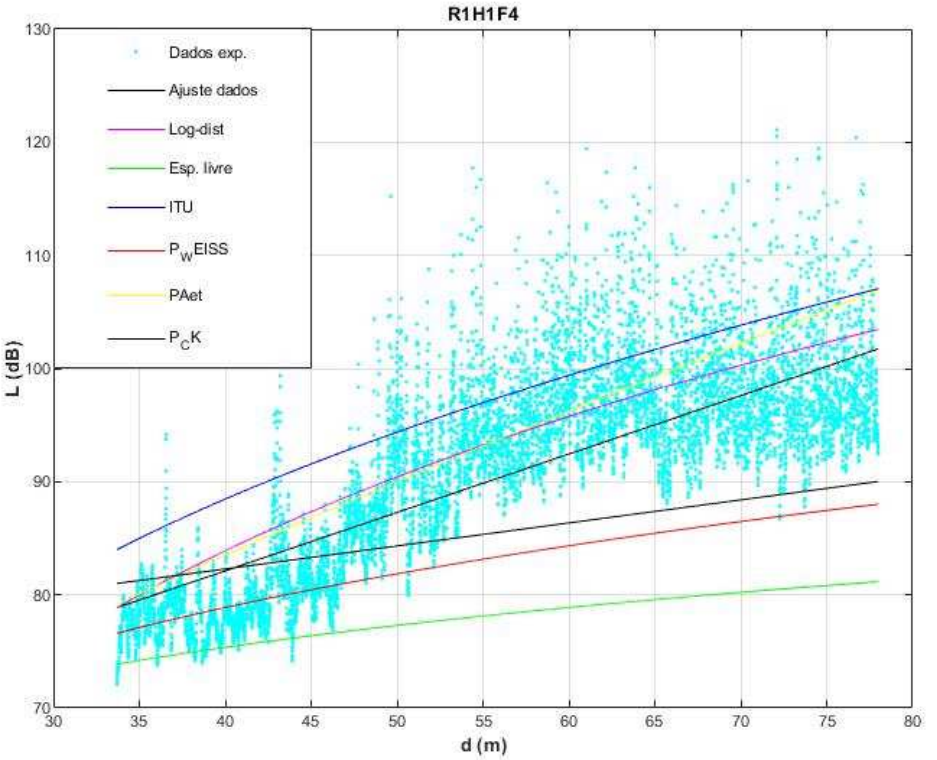

VARIABILIDADE EM PEQUENA ESCALA - PDF
R2H2F1-T1
Nomal
Nakagami
Rayleigh
Rician
Density
Data
×10^-3
×10^4

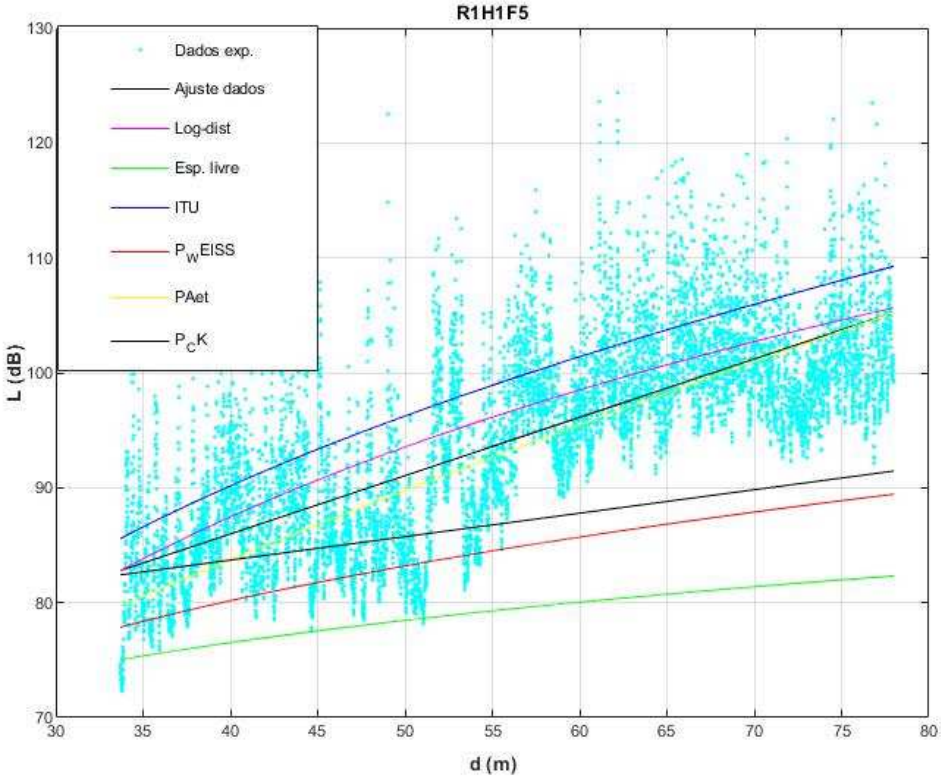

VARIABILIDADE EM PEQUENA ESCALA - PDF
×10^-3
4
3.5
3
2.5
2
1.5
1
0.5
0
Density
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
3.5
4
×10^4
Data
R2H2F1-T2
Normal
Nakagami
Rayleigh
Rician

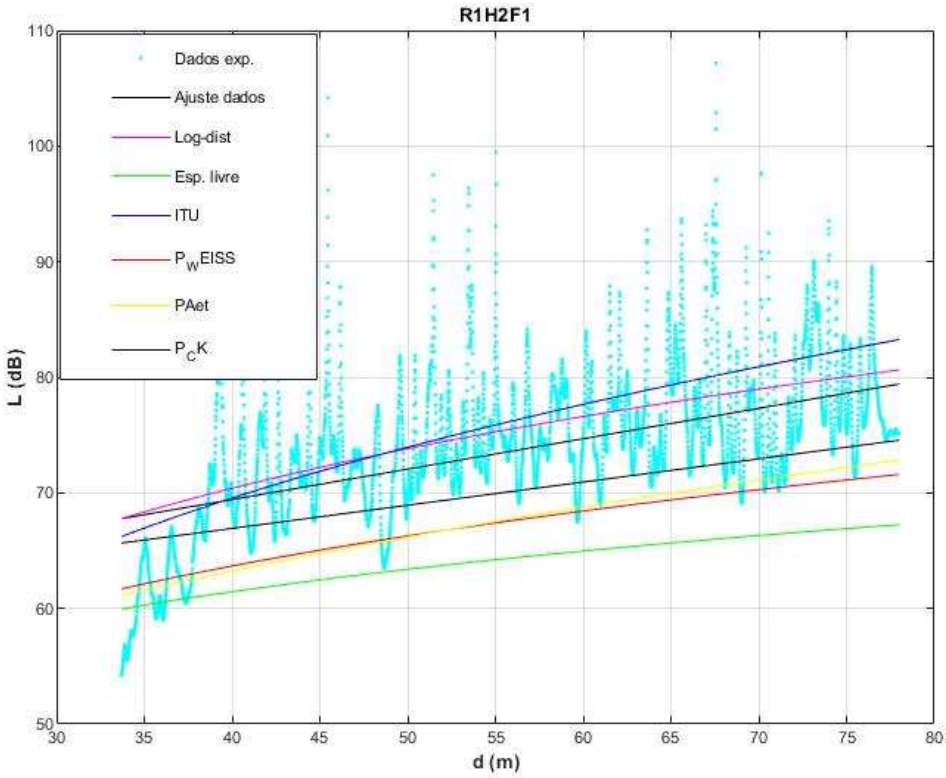
APÊNDICE C
GRÁFICOS PERDA X DISTÂNCIA PARA MODELOS TEÓRICOS

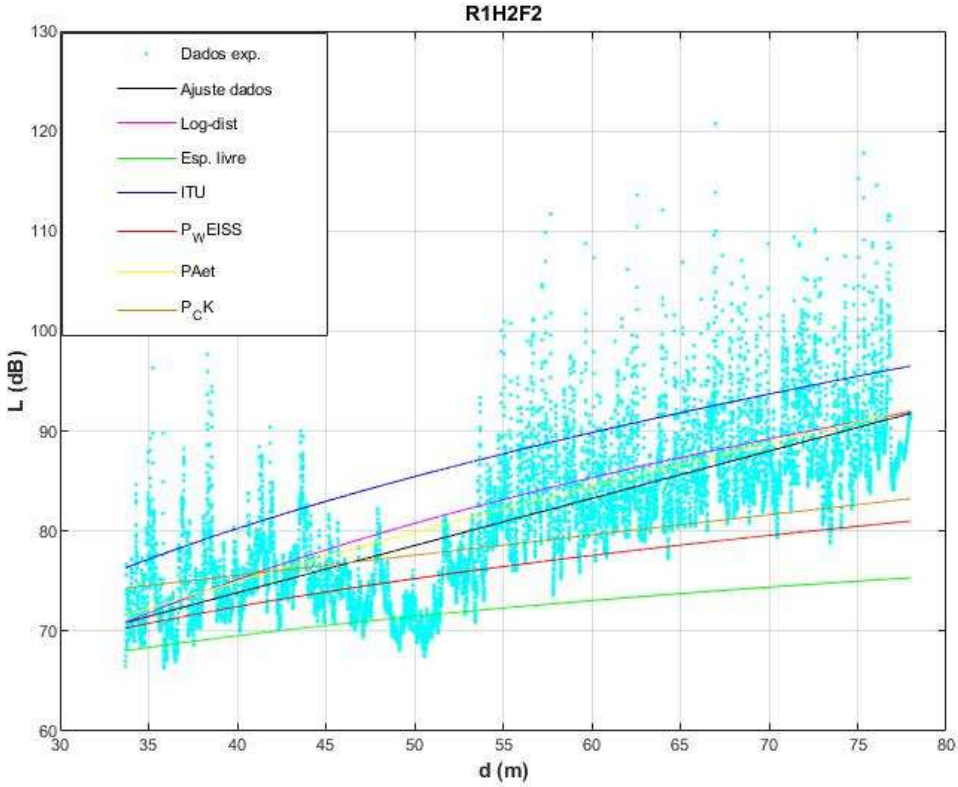


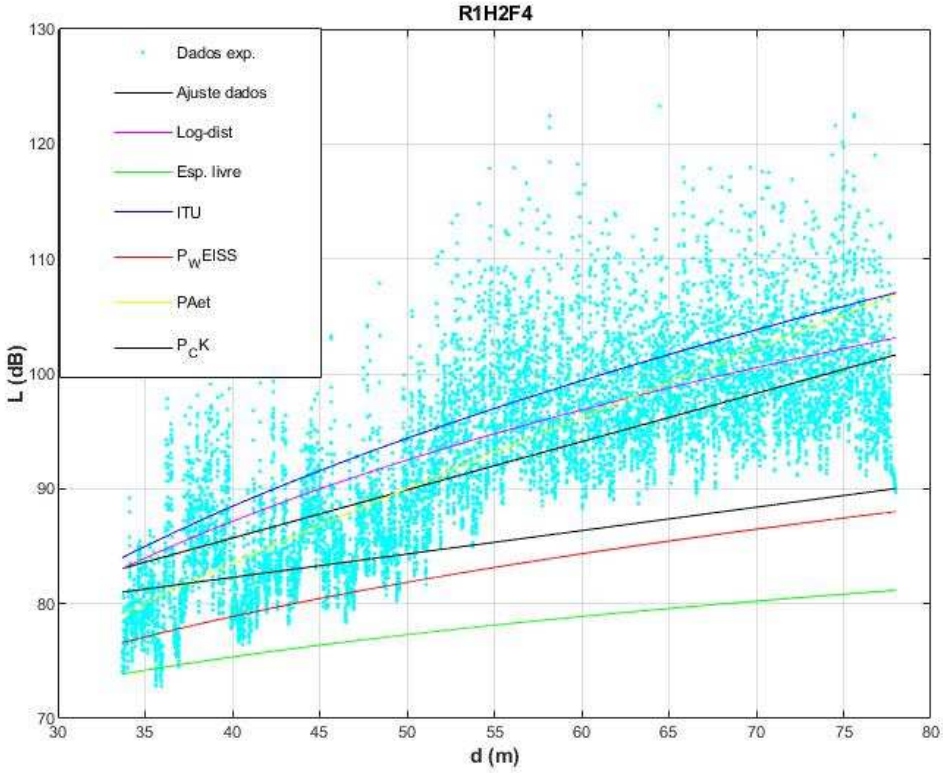

R1H1F3
Dados exp.
Ajuste dados
Log-dist
Esp. livre
ITU
P_WEISS
PAet
P_CK
L (dB)
d (m)
130
120
110
100
90
80
70
60
30
35
40
45
50
55
60
65
70
75
80

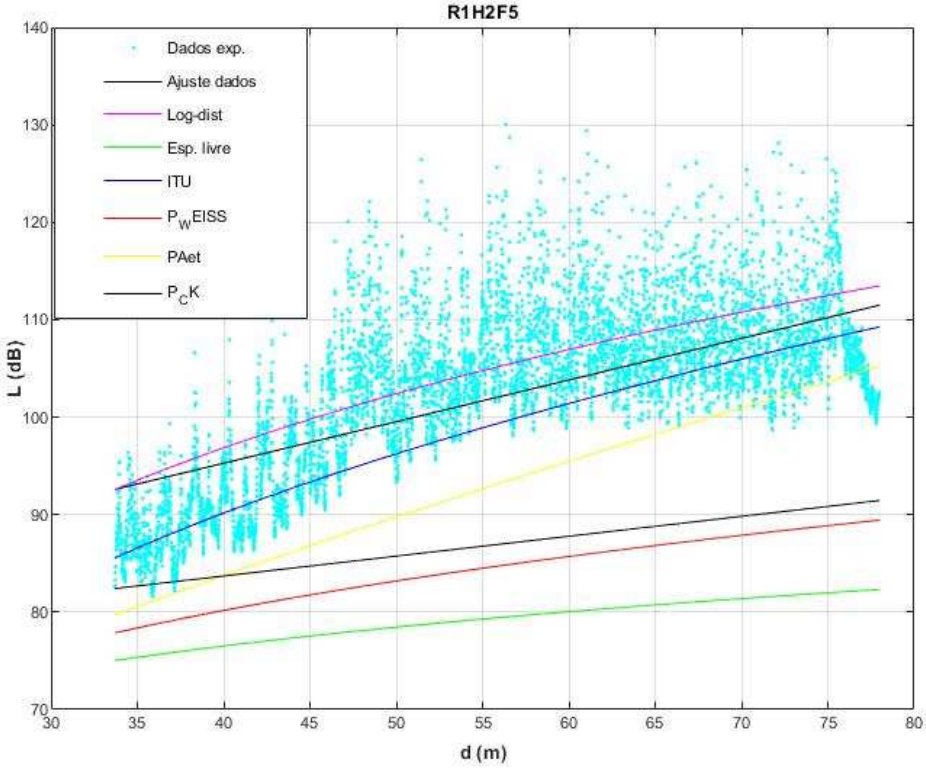

R1H1F4
Dados exp.
Ajuste dados
Log-dist
Esp. livre
ITU
P_WEISS
PAet
P_CK
L (dB)
d (m)
130
120
110
100
90
80
70
30
35
40
45
50
55
60
65
70
75
80

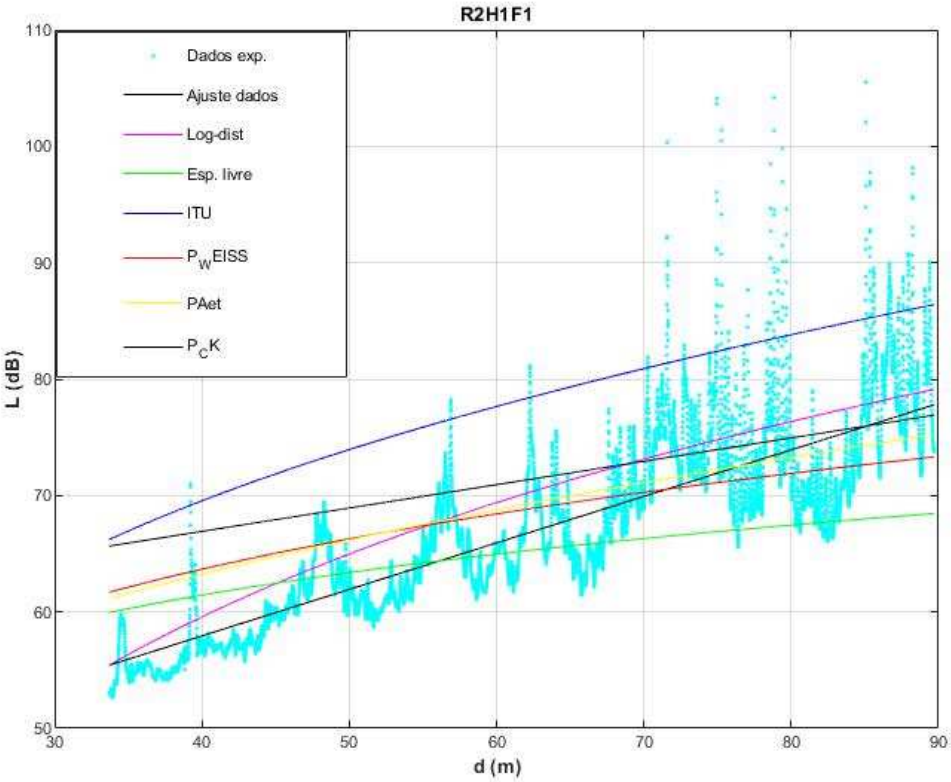

R1H1F5
Dados exp.
Ajuste dados
Log-dist
Esp. livre
ITU
P_W EISS
PAet
P_C K
L (dB)
d (m)
130
120
110
100
90
80
70
30
35
40
45
50
55
60
65
70
75
80

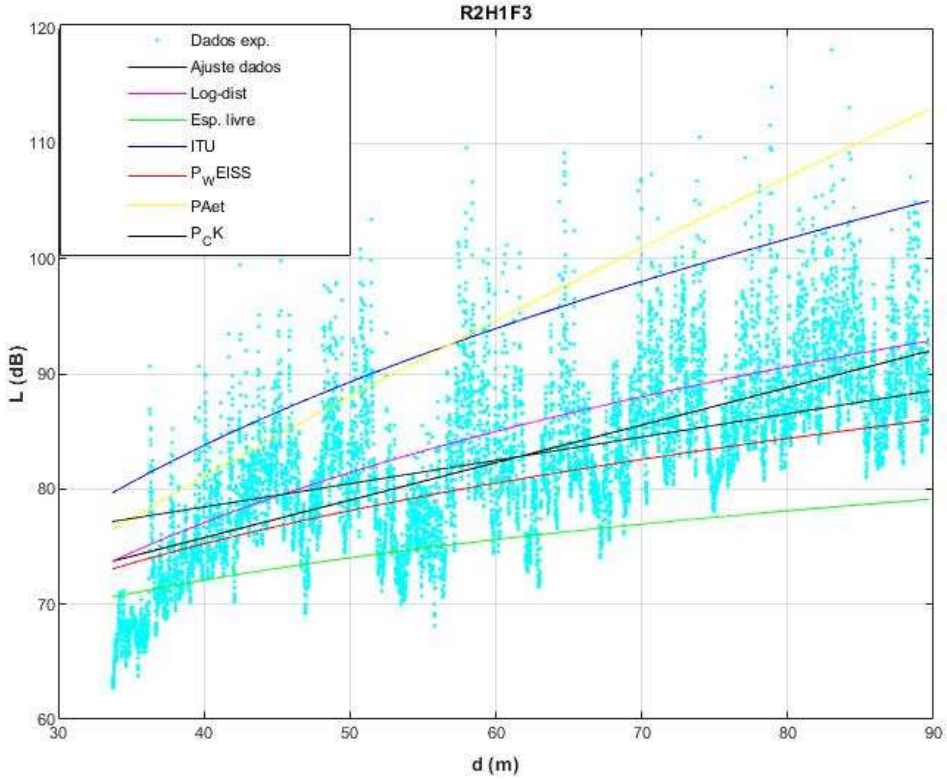

R1H2F1
Dados exp.
Ajuste dados
Log-dist
Esp. livre
ITU
P_W EISS
PAet
P_C K
L (dB)
d (m)
110
100
90
80
70
60
50
30
35
40
45
50
55
60
65
70
75
80

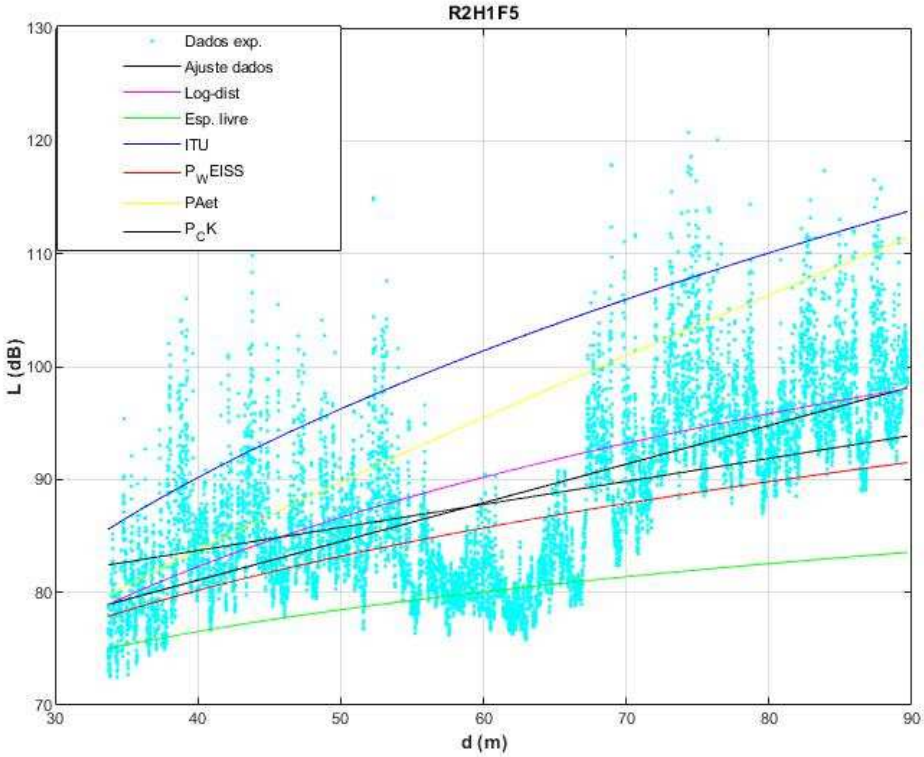

R1H2F2
Dados exp.
Ajuste dados
Log-dist
Esp. livre
ITU
P_W EISS
PAet
P_C K
L (dB)
d (m)
130
120
110
100
90
80
70
60
30
35
40
45
50
55
60
65
70
75
80

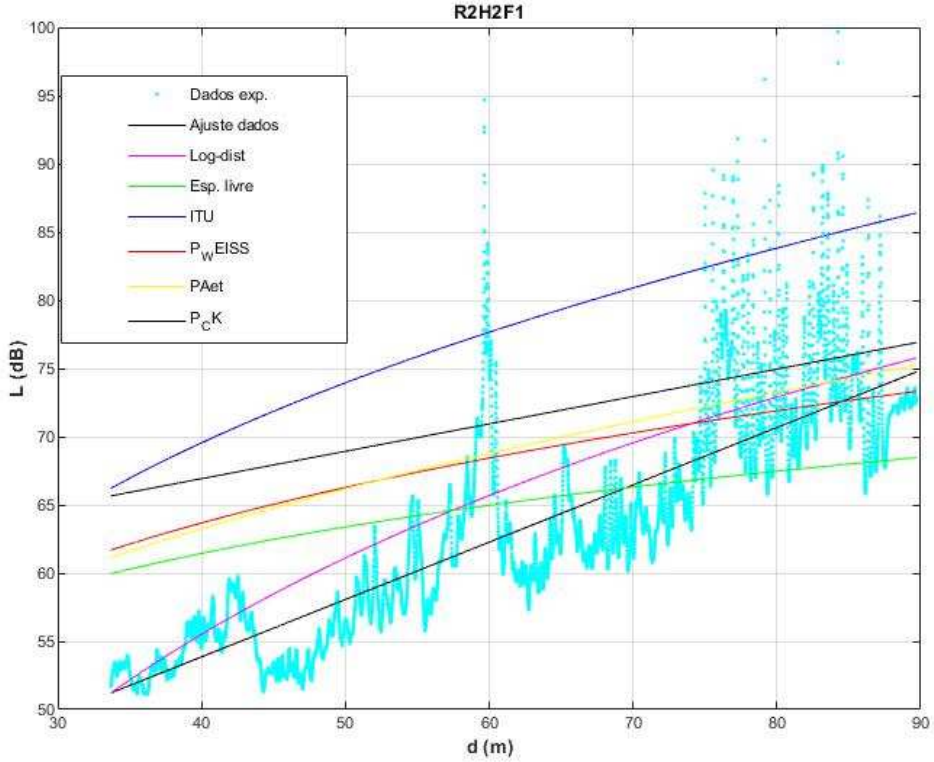

R1H2F4
Dados exp.
Ajuste dados
Log-dist
Esp. livre
ITU
P_W EISS
PAet
P_C K
L (dB)
d (m)
130
120
110
100
90
80
70
30
35
40
45
50
55
60
65
70
75
80

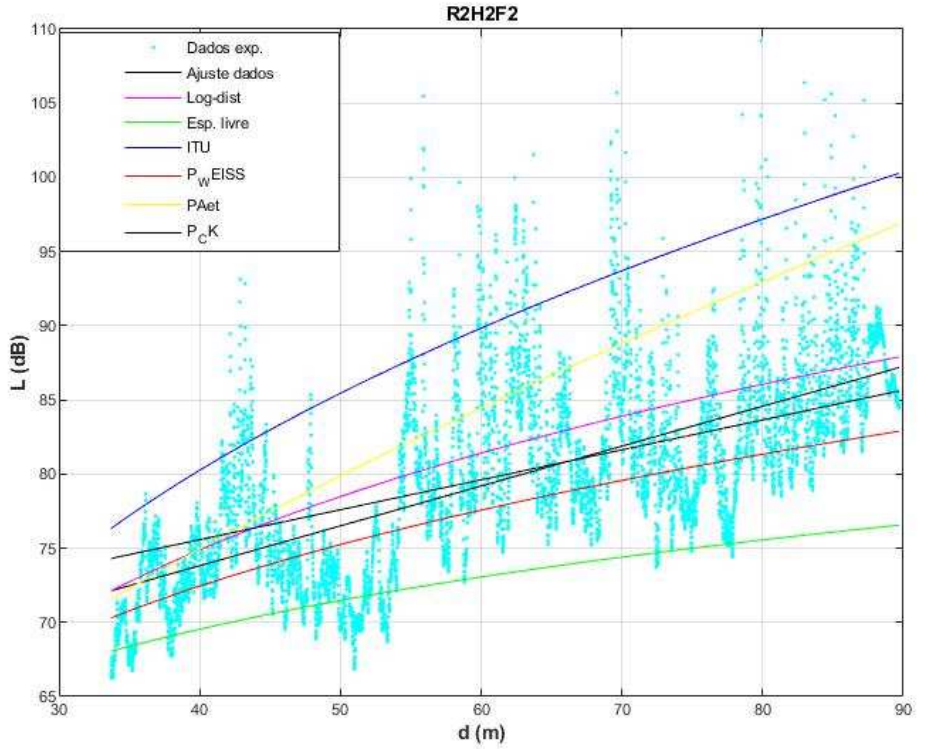

R1H2F5
Dados exp.
Ajuste dados
Log-dist
Esp. livre
ITU
P_W EISS
PAet
P_C K
L (dB)
d (m)
140
130
120
110
100
90
80
70
30
35
40
45
50
55
60
65
70
75
80

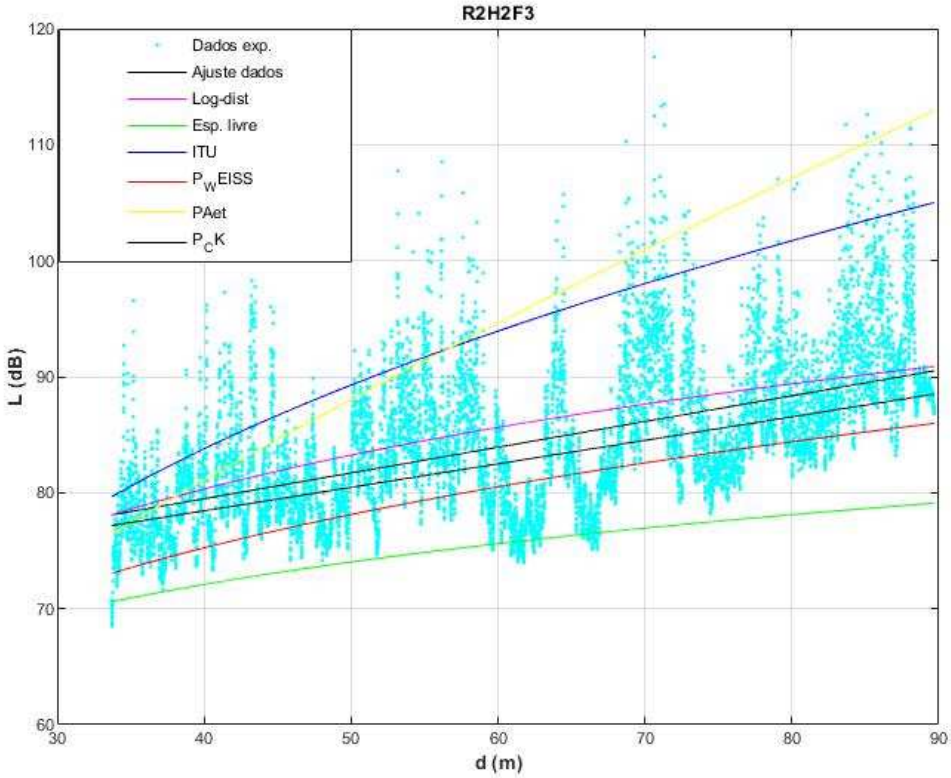

R2H1F1
Dados exp.
Ajuste dados
Log-dist
Esp. livre
ITU
P_W EISS
PAet
P_C K
L (dB)
d (m)
110
100
90
80
70
60
50
30
40
50
60
70
80
90

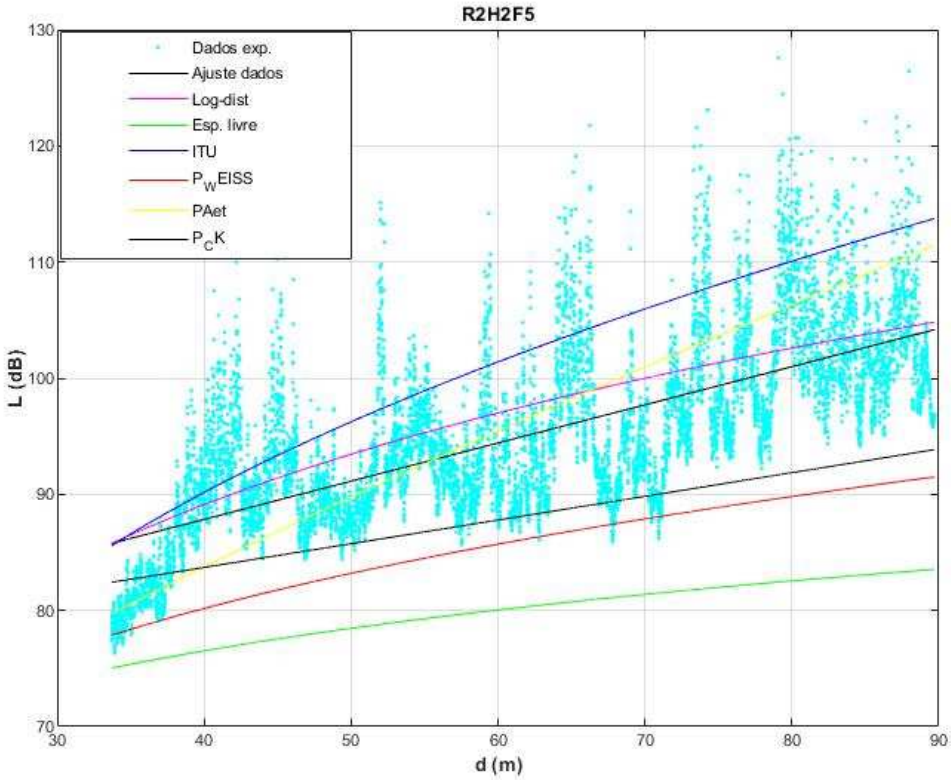

R2H1F3
Dados exp.
Ajuste dados
Log-dist
Esp. livre
ITU
P_W EISS
PAet
P_C K
L (dB)
d (m)
120
110
100
90
80
70
60
30
40
50
60
70
80
90


R2H1F5
Dados exp.
Ajuste dados
Log-dist
Esp. livre
ITU
P_W EISS
PAet
P_C K
L (dB)
d (m)
130
120
110
100
90
80
70
30
40
50
60
70
80
90

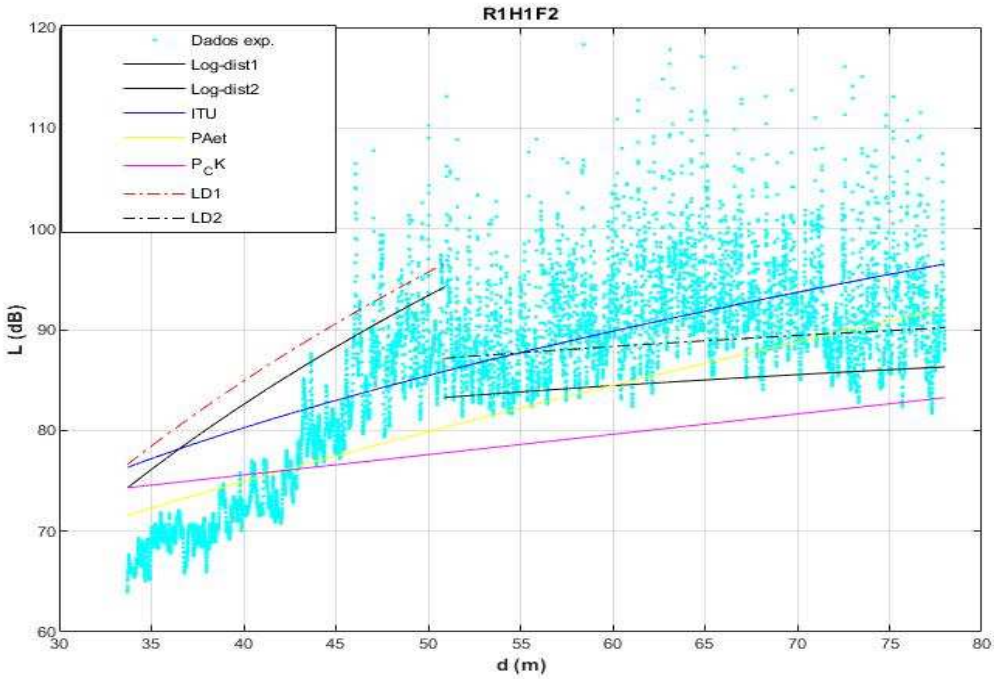

R2H2F1
Dados exp.
Ajuste dados
Log-dist
Esp. livre
ITU
P_W EISS
PAet
P_C K
L (dB)
d (m)
100
95
90
85
80
75
70
65
60
55
50
30
40
50
60
70
80
90

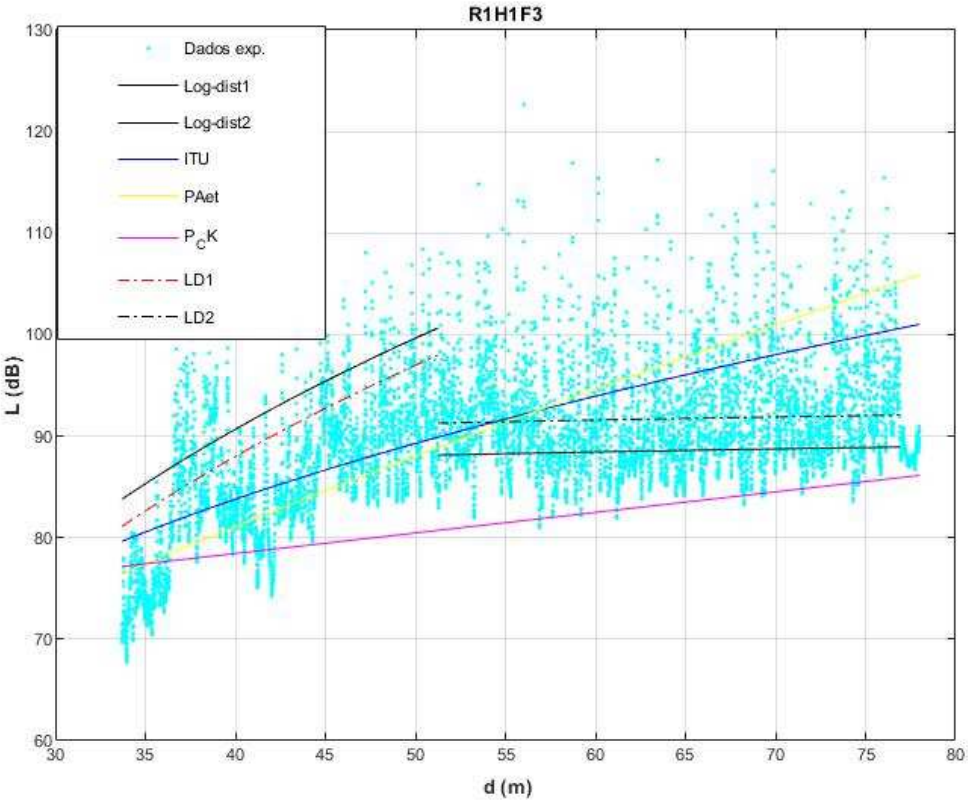

R2H2F2
Dados exp.
Ajuste dados
Log-dist
Esp. livre
ITU
P_W EISS
PAet
P_C K
L (dB)
d (m)
110
105
100
95
90
85
80
75
70
65
30
40
50
60
70
80
90

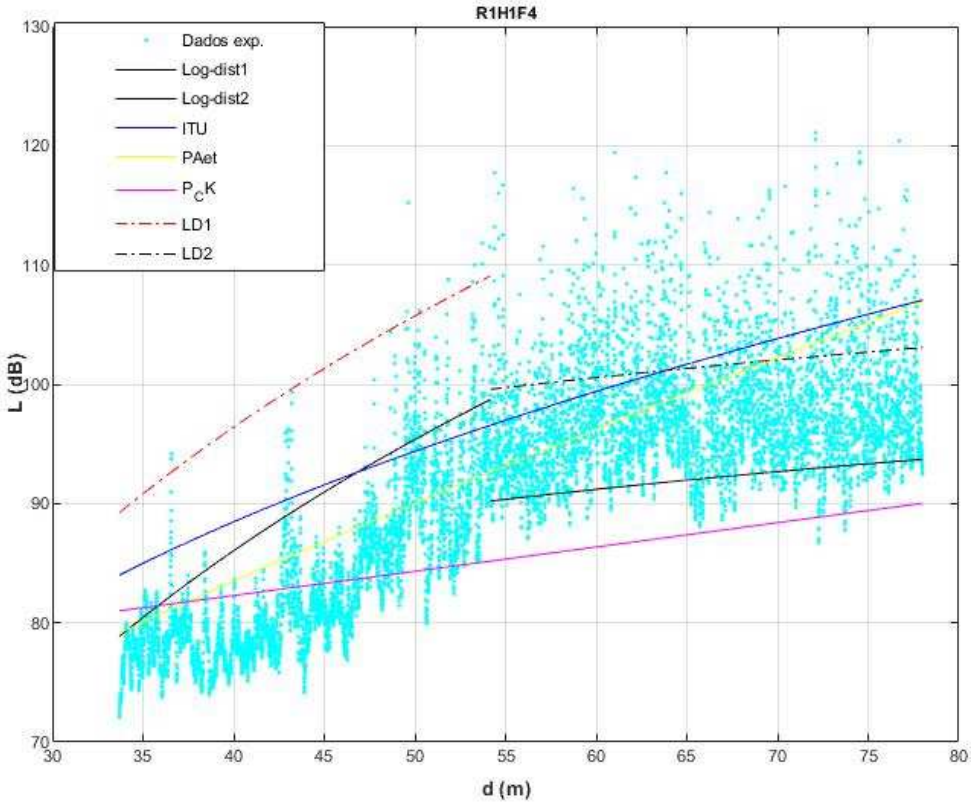

R2H2F3
Dados exp.
Ajuste dados
Log-dist
Esp. livre
ITU
P_W EISS
PAet
P_C K
L (dB)
d (m)
120
110
100
90
80
70
60
30
40
50
60
70
80
90

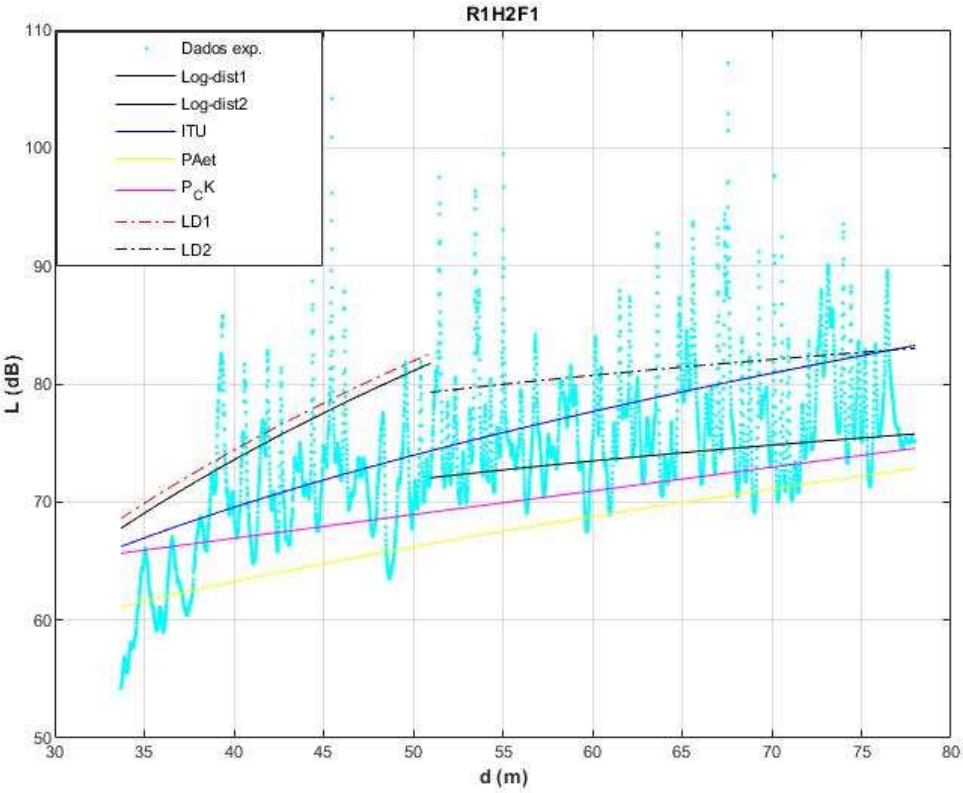

R2H2F5
Dados exp.
Ajuste dados
Log-dist
Esp. livre
ITU
P_W EISS
PAet
P_C K
L (dB)
d (m)
130
120
110
100
90
80
70
30
40
50
60
70
80
90

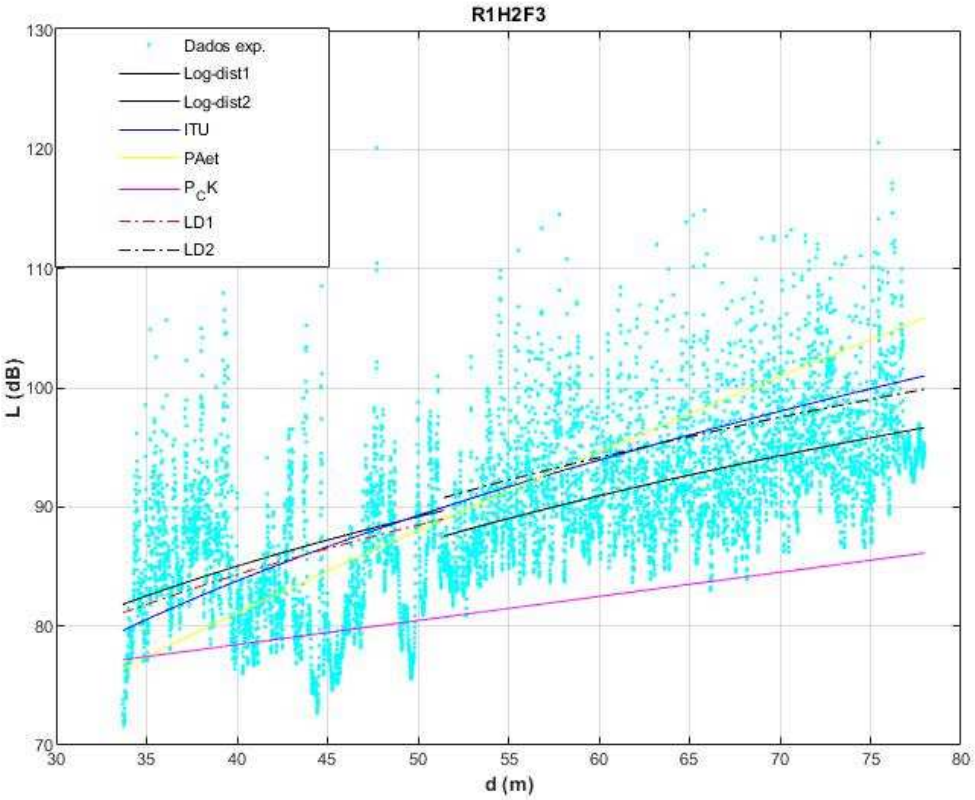
APÊNDICE D
GRÁFICOS PERDA x DISTÂNCIA PARA MODELOS TEORICOS E PROPOSTOS

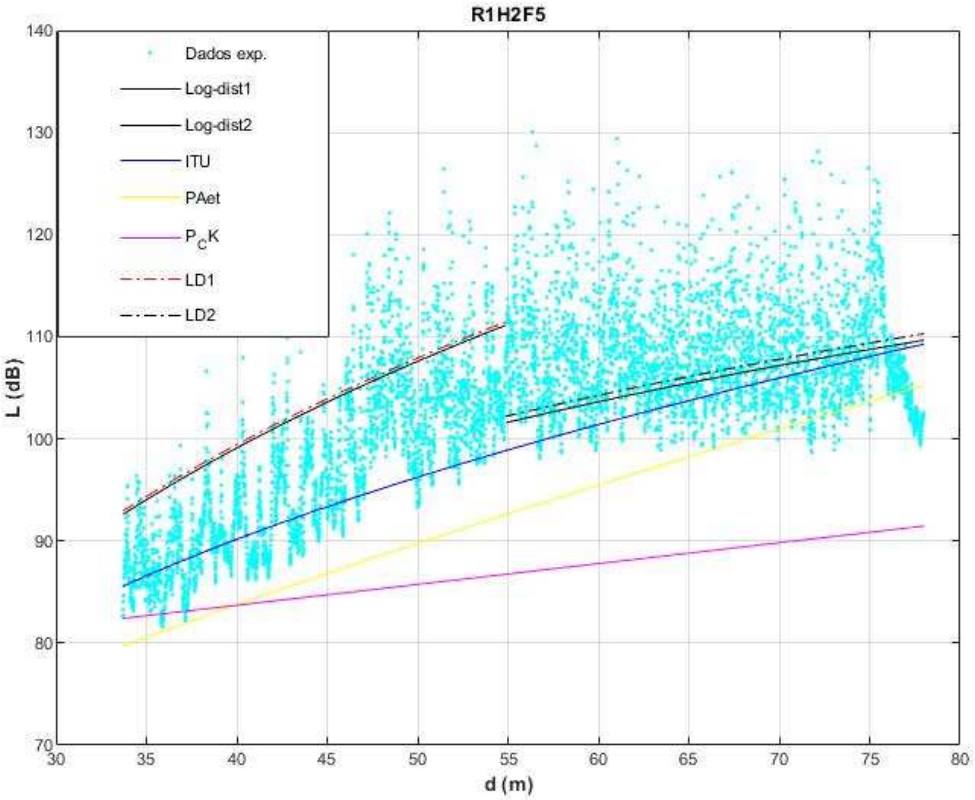


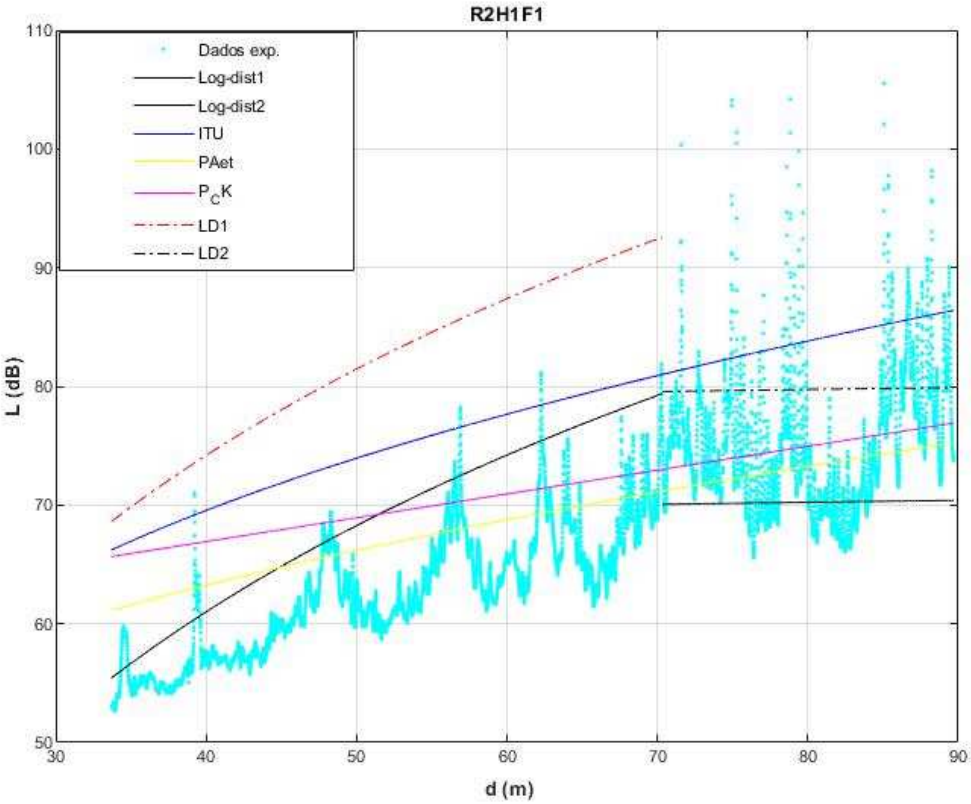


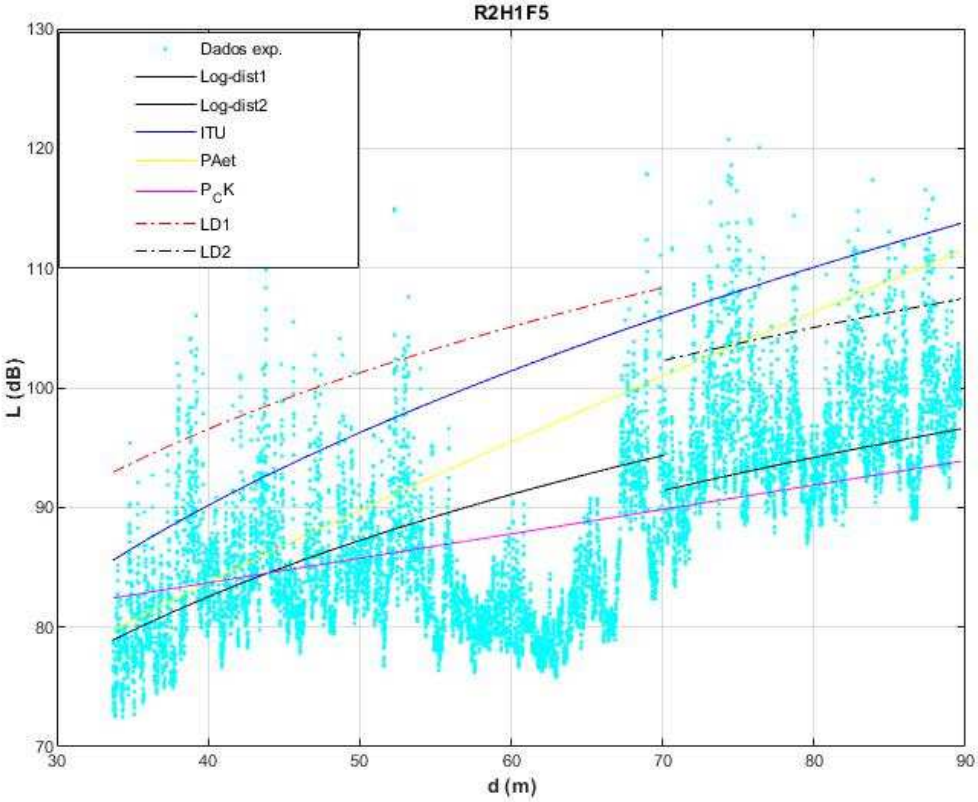

R1H1F4
Dados exp.
Log-dist1
Log-dist2
ITU
PAet
P_CK
LD1
LD2
L (dB)
d (m)
130
120
110
100
90
80
70
30
35
40
45
50
55
60
65
70
75
80

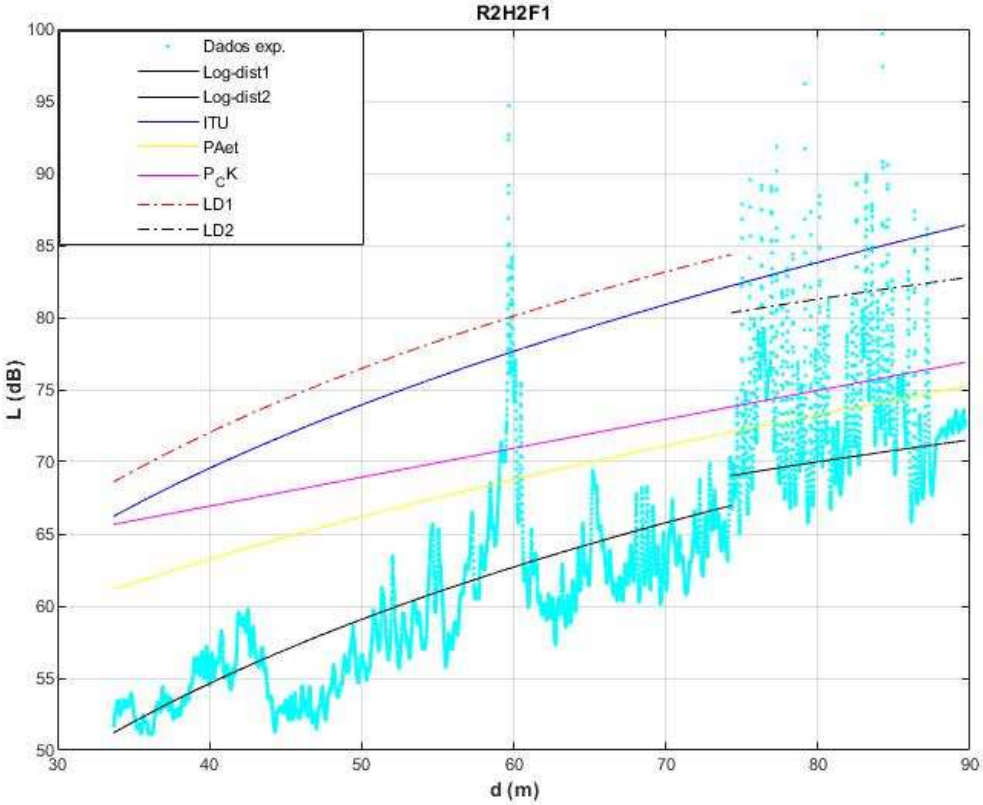

R1H2F1
Dados exp.
Log-dist1
Log-dist2
ITU
PAet
P_CK
LD1
LD2
L (dB)
d (m)
110
100
90
80
70
60
50
30
35
40
45
50
55
60
65
70
75
80

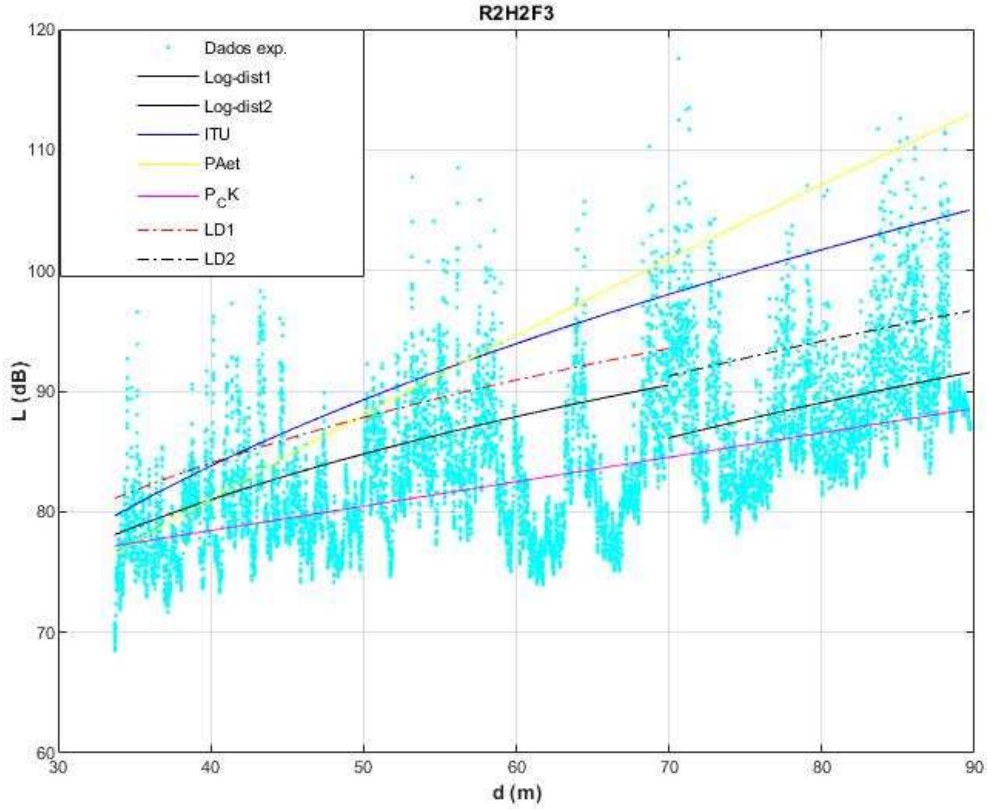

R1H2F3
Dados exp.
Log-dist1
Log-dist2
ITU
PAet
P_CK
LD1
LD2
L (dB)
d (m)
130
120
110
100
90
80
70
30
35
40
45
50
55
60
65
70
75
80

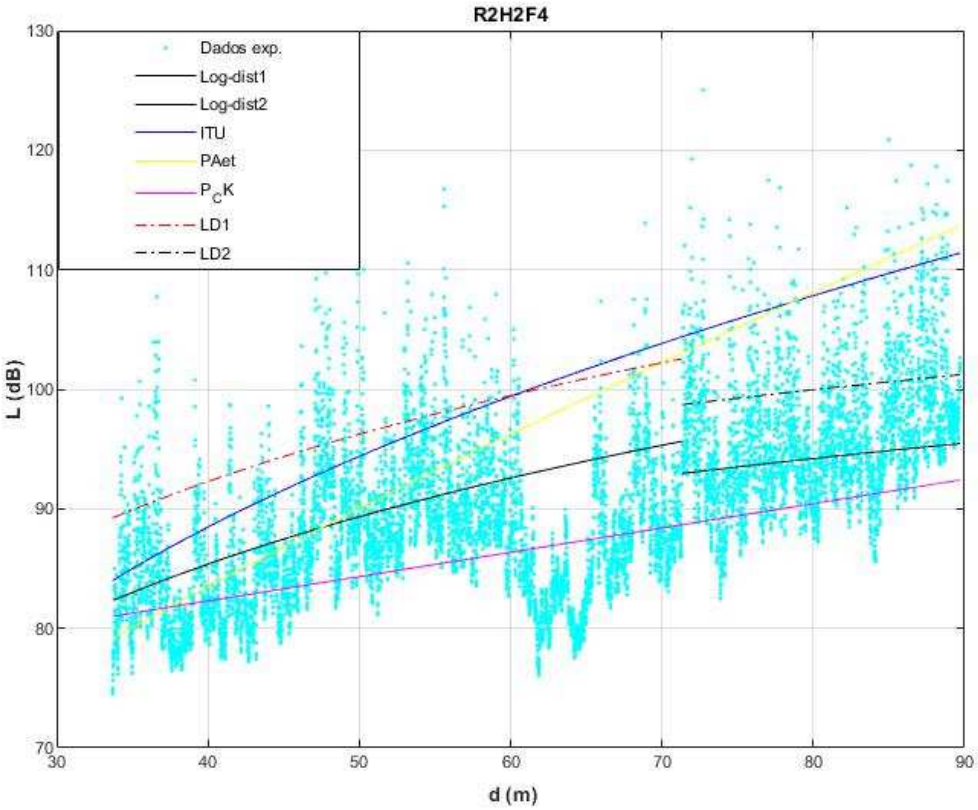

R1H2F5
Dados exp.
Log-dist1
Log-dist2
ITU
PAet
P_CK
LD1
LD2
L (dB)
d (m)
140
130
120
110
100
90
80
70
30
35
40
45
50
55
60
65
70
75
80


R2H1F1
Dados exp.
Log-dist1
Log-dist2
ITU
PAet
P_CK
LD1
LD2
L (dB)
d (m)
110
100
90
80
70
60
50
30
40
50
60
70
80
90


R2H1F5
Dados exp.
Log-dist1
Log-dist2
ITU
PAet
P_CK
LD1
LD2
L (dB)
d (m)
130
120
110
100
90
80
70
30
40
50
60
70
80
90


R2H2F1
Dados exp.
Log-dist1
Log-dist2
ITU
PAet
P_CK
LD1
LD2
L (dB)
d (m)
100
95
90
85
80
75
70
65
60
55
50
30
40
50
60
70
80
90


R2H2F3
Dados exp.
Log-dist1
Log-dist2
ITU
PAet
P_CK
LD1
LD2
L (dB)
d (m)
120
110
100
90
80
70
60
30
40
50
60
70
80
90


R2H2F4
Dados exp.
Log-dist1
Log-dist2
ITU
PAet
P_C K
LD1
LD2
L (dB)
d (m)
130
120
110
100
90
80
70
30
40
50
60
70
80
90