

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DE ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO E
SISTEMAS

DISSERTAÇÃO

**CARACTERIZAÇÃO DE CANAL EM BANDA ESTREITA NAS FAIXAS DE
900 MHZ E 2,4 GHZ EM ÁREAS DE VIVÊNCIA COM PREDOMINÂNCIA DE
VEGETAÇÃO PARA PROJETOS DE PARQUES DIGITAIS**

AMANDA BEATRIZ CUNHA DOS SANTOS

SÃO LUÍS - MA
2019

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO E
SISTEMAS

AMANDA BEATRIZ CUNHA DOS SANTOS

DISSERTAÇÃO

**CARACTERIZAÇÃO DE CANAL EM BANDA ESTREITA NAS FAIXAS DE
900 MHZ E 2,4 GHZ EM ÁREAS DE VIVÊNCIA COM PREDOMINÂNCIA DE
VEGETAÇÃO PARA PROJETOS DE PARQUES DIGITAIS**

Dissertação apresentada ao programa de Mestrado Profissional em Engenharia da Computação e Sistemas da Universidade Estadual do Maranhão como pré-requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia da Computação e Sistemas

Orientador: Prof^o. Dr. Leonardo Henrique Gonsioroski
Furtado da Silva

SÃO LUÍS - MA
2019

Santos, Amanda Beatriz Cunha dos.

Caracterização de canal em banda estreita nas faixas de 900 MHz e 2,4 GHz em áreas de vivência com predominância de vegetação para projetos de parques digitais / Amanda Beatriz Cunha dos Santos. – São Luís, 2019.

113 f

Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia da Computação e Sistemas, Universidade Estadual do Maranhão, 2019.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Gonsioroski.

1.Caracterização de canal. 2. Banda estreita. 3.IEEE 802.11ah.
4.Ambientes com vegetação. I. Título

CDU: 004.738.5:728.1(1-22)

AMANDA BEATRIZ CUNHA DOS SANTOS

DISSERTAÇÃO

**CARACTERIZAÇÃO DE CANAL EM BANDA ESTREITA NAS FAIXAS DE
900 MHZ E 2,4 GHZ EM ÁREAS DE VIVÊNCIA COM PREDOMINÂNCIA DE
VEGETAÇÃO PARA PROJETOS DE PARQUES DIGITAIS**

Dissertação apresentada ao programa de Mestrado Profissional em Engenharia da Computação e Sistemas da Universidade Estadual do Maranhão como pré-requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia da Computação e Sistemas.

Aprovado em: 10 de outubro de 2019



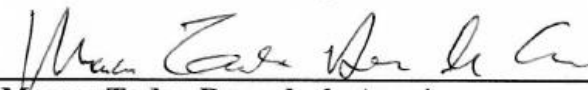
Prof. Dr. Leonardo Henrique Gonsioroski Furtado da Silva
(Orientador-UEMA)



Prof. Rogério Moreira Lima Silva
(UEMA)



Prof. Henrique Mariano Costa do Amaral
(UEMA)



Prof. Marcos Tadeu Resende de Araujo
(UFMA)

À Deus pela vida, minha família e a todos que me apoiaram.

AGRADECIMENTOS

A Deus por sua misericórdia e força dada a mim para superação de cada dificuldade na elaboração deste trabalho. Aos meus pais Nilson Ferreira dos Santos e Valdenice Pires da Cunha por todo amor, cuidado, e garra, contribuindo inteiramente em tudo que sou. Estendendo, aos meus irmãos por toda determinação prestada e conforto em momentos difíceis.

Ao meu orientador Prof. Dr. Leonardo Gonsioroski que esteve presente desde o início, em cada detalhe desse trabalho, por toda paciência, suporte e a sua inestimável ajuda para conclusão de todo projeto.

A todos os colegas que me apoiaram e se fizeram presentes sendo que direta ou indiretamente me ajudaram, em especial aos amigos: Sandra Elói, Jairon Batista e Beatriz Nery.

À Universidade Estadual do Maranhão, seu corpo docente, administração e direção geral que oportunizaram a realização de mais uma etapa evolutiva em minha formação, ajudando também financeiramente durante o curso me possibilitando concluir esse trabalho. Em especial está Karoline Meireles e Valeria Nunes que me proporcionaram todo suporte administrativo na Instituição.

A coordenação do CETUC da PUC-RIO pelo apoio técnico e infraestrutura prestada. Em especial aos professores Dr. Luiz Alencar Reis da Silva Mello e Dr. Pedro Vladimir Gonzalez Castellanos pela participação nas medições e testes aqui apresentados. Sou grata também aos alunos doutorandos pela ajuda no laboratório e participações nas medições.

RESUMO

Santos, Amanda. **Caracterização de Canal em Banda Estreita nas Faixas de 900 MHz E 2,4 GHz em Áreas de Vivência com Predominância de Vegetação para Projetos de Parques Digitais.** São Luís, 2019. Dissertação de Mestrado - Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Maranhão.

Pela constante busca da melhoria para o dimensionamento de modernos sistemas de comunicação, há uma maior necessidade de se estudar os parâmetros que possibilitam a caracterização do canal rádio móvel. Nesse sentido, muitos estudos foram realizados, entretanto, pouco tem sido em áreas com predominância de vegetação onde é fundamental que sistemas de comunicação sem fio, o IEEE 802.11, sejam projetados, como no caso dos parques digitais, que têm sido encontrados cada vez mais nos grandes centros urbanos e arredores. Desta forma, o presente trabalho, busca, caracterizar a perda de propagação do canal através dos modelos de predição Weissberger, COST-23, Early ITU-R e FITUR em áreas com predominância em vegetação, analisando tais modelos em um comparativo com alguns modelos empíricos urbanos já conhecidos nas faixas de 900MHz e 2,4GHz, através de duas campanhas de medições em banda estreita realizadas dentro do campus da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC, no Rio de Janeiro. Os resultados obtidos revelam que dos modelos empíricos utilizados, o que mostrou melhor aderência aos dados experimentais encontrados, foi o de Okumura-Hata para regiões suburbanas. Os modelos usados para áreas com predominância de vegetação apresentaram boas concordâncias, sendo que, o modelo FITUR apresentou valores mais próximos dos dados em 900MHz e, o modelo de Weissberger apresentou melhor aderência aos dados coletados em 2,4GHZ. Foi possível, através dos dados coletados, calcular os valores da constante de decaimento com a distância (d) de acordo com as perdas e, verificar que os resultados obtidos estão de acordo com outros resultados de pesquisas nessa área, validando a importância dessa pesquisa para os sistemas de rede sem fio em ambientes com forte presença de vegetação. Se propõe, ainda, que a maior área de concentração de vegetação do campus da PUC, onde se realizou as medições, sirva como ambiente de estudo para simular a propagação do sinal em parques digitais que possuam as características comuns a maioria desses ambientes nas cidades brasileiras.

Palavras-chave: Caracterização do Canal; Banda Estreita; IEEE 802.11; Ambientes com Vegetação.

ABSTRACT

Santos, Amanda. **Caracterização de Canal em Banda Estreita nas Faixas de 900 MHz E 2,4 GHz em Áreas de Vivência com Predominância de Vegetação para Projetos de Parques Digitais.** São Luís, 2019. Dissertação de Mestrado - Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Maranhão.

Due to the constant search for improvement for the design of modern communication systems, there is a greater need to study the parameters that allow characterizing the mobile radio channel. In this sense, many studies have been carried out, however, little has been done in areas with predominance of vegetation where it is essential that wireless communication systems, or IEEE 802.11, are designed, as in the case of digital films, which have been increasingly found in major urban centers and surroundings. Thus, the present work, search, characterizes the loss of channel propagation through prediction models Weissberger, COST-23, ITU-R and FITUR anticipated in areas with vegetation predominance, analyzing these models in a comparison with some empirical models. already known urban areas in the 900MHz and 2.4GHz bands, through two band measurement campaigns initiated on the campus of the Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro - PUC in Rio de Janeiro. The obtained results reveal the empirical models used, or those that presented better adherence to the experimental data found, were those of Okumura-Hata for suburban regions. The models used for areas with vegetation predominance show good agreement, with the FITUR model showing the latest data values at 900MHz and the Weissberger model showing the best adherence to the data collected at 2.4GHZ. It was possible, using collected data, to calculate the values of the decay constant with distance (d) according to the variations and to verify the results shown after the agreement with other research results in this area, validating the importance of this research for the network systems. wireless in environments with strong presence of vegetation. Also, what is the area of greatest vegetation concentration of the campus of PUC, where it is performed as measurements, as the study environment for simulation of signal propagation in digital films that has as common resources most of these environments in Brazilian cities.

Keywords: *Channel characterization; Narrow Band; IEEE 802.11; Vegetation Environments.*

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: Alcance e frequência dos padrões IEEE 802.11. | 17 |
| Figura 2: Mecanismo de Propagação..... | 21 |
| Figura 3: Representação do fenômeno de reflexão. | 22 |
| Figura 4: Representação do fenômeno de difração | 22 |
| Figura 5: Representação do fenômeno de espalhamento..... | 23 |
| Figura 6: Propagação por Multipercursos | 23 |
| Figura 7: Desvanecimentos em pequena e larga escalas | 25 |
| Figura 8: Comportamento do Canal Rádio Móvel | 30 |
| Figura 9: Distância (d) de Propagação em Árvores..... | 38 |
| Figura 10: Arquitetura 802.11 | 42 |
| Figura 11: Disponibilidade dos canais no padrão 802.11b..... | 43 |
| Figura 12: Distribuição das frequências de acordo com a aplicação..... | 44 |
| Figura 13: Padrão 802.11 a – Estrutura de canais | 45 |
| Figura 14: Diferença de velocidade entre os padrões de rede b, g e n. | 46 |
| Figura 15: Distância (d) de Propagação em Árvores..... | 51 |
| Figura 16: Imagens da Área de Vivência 1 – Ambientes de Medidas | 52 |
| Figura 17: Imagens da Área de Vivência 2 – Ambientes de Medidas | 53 |
| Figura 18: Distância (d) de Propagação em Árvores..... | 54 |
| Figura 19: Estrutura do Setup de Transmissão..... | 56 |
| Figura 20: Resposta do amplificador Milmega AS0204-7..... | 56 |
| Figura 21: Informações técnicas da antena utilizada no setup de transmissão..... | 56 |
| Figura 22: Estrutura do Setup de Recepção das Medições na Área de Vivência 1 | 57 |
| Figura 23: Tabelas de parâmetros dos setups de transmissão para 900 MHz e 2500 MHz | 58 |
| Figura 24: Estrutura do Setup de Recepção das Medições na Área de Vivência 2..... | 58 |
| Figura 25: Comparação das perdas de propagação medidas em 900 MHz e 2500 MHz. | 62 |
| Figura 26: Reta de Ajuste de Perda com a Distância – 900 MHz | 64 |
| Figura 27: Reta de Ajuste de Perda com a Distância – 2500 MHz | 64 |
| Figura 28: Distribuição de Probabilidade do Desvanecimento em Larga Escala para 900 MHz | 65 |
| Figura 29: Distribuição de Probabilidade do Desvanecimento em Larga Escala para 2500 MHz | 65 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 30: Distribuição de Probabilidade do Cumulativa das Perdas de Potência na faixa de 900 MHz e de 2500 MHz | 66 |
| Figura 31: Comparação das Medidas de Perda de Potência em 900 MHz e de 2500 MHz com o Modelo de Perda no Espaço Livre..... | 68 |
| Figura 32: Comparação das Medidas de Perda de Potência em 900 MHz (laranja) e de 2500 MHz (azul) com o Modelo SUI..... | 69 |
| Figura 33: Comparação das Medidas de Perda de Potência em 900 MHz (laranja) e de 2500 MHz (azul) com o Modelo Okumura-Hata | 70 |
| Figura 34: Comparação das Medidas de Perda de Potência em 900 MHz (laranja) e de 2500 MHz (azul) com o Modelo COST 231 | 71 |
| Figura 35: Comparação das Medidas de Perda de Potência em 900 MHz (laranja) e em 2500 MHz (azul) com os Modelos Weissberg e COST 235 | 73 |
| Figura 36: Comparação das Medidas de Perda de Potência em 900 MHz (laranja) e em 2500 MHz (azul) com os Modelos Early ITU-R e Fitted ITU-R | 74 |
| Figura 37: Trecho 1 utilizado para Análise de Variabilidade em Pequena Escala com Visada | 78 |
| Figura 38: Curvas de PDF e CDF para a Análise em Pequena Escala para 900MHz – Trecho 1 (LOS)..... | 78 |
| Figura 39: Curvas de PDF e CDF para a Análise em Pequena Escala para 2500MHz – Trecho 1 (LOS)..... | 79 |
| Figura 40: Trecho 2 utilizado para Análise de Variabilidade em Pequena Escala com Visada | 80 |
| Figura 41: Curvas de PDF e CDF para a Análise em Pequena Escala para 900MHz – Trecho 2 (LOS)..... | 81 |
| Figura 42: Curvas de PDF e CDF para a Análise em Pequena Escala para 2500MHz – Trecho 2 (LOS)..... | 82 |
| Figura 43: Curvas de PDF e CDF para a Análise em Pequena Escala para 900MHz – Trecho 3 (NLOS)..... | 83 |
| Figura 44: Curvas de PDF e CDF para a Análise em Pequena Escala para 2500MHz – Trecho 3 (NLOS)..... | 83 |
| Figura 45: Curvas de PDF e CDF para a Análise em Pequena Escala para 900MHz – Trecho 4 (NLOS)..... | 84 |
| Figura 46: Curvas de PDF e CDF para a Análise em Pequena Escala para 2500MHz – Trecho 4 (NLOS)..... | 85 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1: Expoente de perda de percurso para diferentes ambientes..... | 27 |
| Tabela 2: Resumo dos principais tipos de modelos de propagação | 32 |
| Tabela 3: Constantes para Modelo SUI..... | 36 |
| Tabela 4: Características dos Padrões Wi-Fi:..... | 49 |
| Tabela 5: Descrição das principais distribuições de probabilidade..... | 60 |
| Tabela 6: Representação das tabelas de dados capturados | 61 |
| Tabela 7: Expoente de perda de percurso da Potência com a Distância..... | 63 |
| Tabela 8: Valores dos parâmetros das distribuições de probabilidade da perda de propagação para cada faixa de frequência estudada | 67 |
| Tabela 9: Tabela de erros calculados entre os valores medidos e o modelo de propagação no espaço livre..... | 69 |
| Tabela 10: Tabela de erros calculados entre os valores que foram medidos e o modelo de propagação SUI | 70 |
| Tabela 11: Tabela de erros calculados entre os valores medidos e o modelo de propagação Okumura-Hata | 71 |
| Tabela 12: Tabela de erros calculados entre os valores medidos e o modelo de propagação COST 231 | 72 |
| Tabela 13: Tabela de erros calculados entre os valores medidos e os valores preditos pelos quatro modelos de propagação para ambientes com vegetação | 75 |
| Tabela 14: Resumo dos valores de comparação entre os modelos e os resultados das medições | 76 |
| Tabela 15: Informações estatísticas de Pequena Escala para 900 MHz - Trecho 1 | 79 |
| Tabela 16: Informações estatísticas de Pequena Escala para 2500 MHz - Trecho 1 | 80 |
| Tabela 17: Informações estatísticas de Pequena Escala para 900 MHz - Trecho 2 | 81 |
| Tabela 18: Informações estatísticas de Pequena Escala para 2500 MHz - Trecho 2 | 82 |
| Tabela 19: Informações estatísticas de Pequena Escala para 900 MHz – Trecho3..... | 83 |
| Tabela 20: Informações estatísticas de Pequena Escala para 2500 MHz - Trecho 3 | 84 |
| Tabela 21: Informações estatísticas de Pequena Escala para 900 MHz – Trecho4..... | 85 |
| Tabela 22: Informações estatísticas de Pequena Escala para 2500 MHz - Trecho 4 | 85 |
| Tabela 23: Distribuições que melhor se ajustaram aos dados empíricos em cada trecho e em cada frequência..... | 86 |

LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|---------------|----------------------------------------------------------------------|
| ANATEL | <i>Agência brasileira de normas técnicas</i> |
| AT | <i>Access Point</i> |
| BIT | <i>Binary Digit</i> |
| BSS | <i>Basic Service Set</i> |
| CW | <i>Continuous Wave</i> |
| COST | <i>Cooperation in the field of Scientific and Technical research</i> |
| DB | <i>Decibel</i> |
| DSSS | <i>Direct Sequence Spread Spectrum</i> |
| ERB | <i>Estação Rádio Base</i> |
| FCC | <i>Federal Communications Commission</i> |
| FHSS | <i>Frequency Hopping Spread Spectrum</i> |
| GPS | <i>Global Positioning System</i> |
| IEEE | <i>Institute of electrical and electronics engineers</i> |
| ISM | <i>Industrial Scientific and Medical</i> |
| ITU-R | <i>International Telecommunication Union - Recommendation</i> |
| LNA | <i>Low Noise Amplifier</i> |
| LOS | <i>Line of Sight</i> |
| MATLAB | <i>Matrix laboratory</i> |
| MLE | <i>Maximum- Likelihood Estimation</i> |
| NLOS | <i>Non Line of Sight</i> |
| OFDM | <i>Orthogonal Frequency – Division Multiplexing</i> |
| PDF | <i>Probability Density Function</i> |
| RMS | <i>Root Medium Square</i> |
| SUI | <i>Stanford University Interim</i> |
| SSID | <i>Service Set Identifier</i> |

| | |
|--------------|--------------------------------------------------------|
| STA | <i>Station</i> |
| UHF | <i>Ultra High Frequency</i> |
| WECA | <i>Wireless Ethernet Compatibility Alliance</i> |
| WI-FI | <i>Wireless Fidelity</i> |
| WIMAX | <i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i> |

SUMÁRIO

| | | |
|-------|-------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 16 |
| 1.1 | Objetivos | 19 |
| 1.1.1 | Objetivo geral..... | 19 |
| 1.1.2 | Objetivos específicos..... | 20 |
| 1.2 | Organização do Trabalho | 20 |
| 2 | O CANAL DE RÁDIO PROPAGAÇÃO MÓVEL | 21 |
| 2.1 | Mecanismos de propagação..... | 21 |
| 3 | CARACTERIZAÇÃO EM BANDA ESTREITA | 24 |
| 3.1 | Perda de Percurso (<i>Path Loss</i>)..... | 25 |
| 3.2 | Desvanecimento em Larga Escala..... | 28 |
| 3.3 | Desvanecimento em Pequena Escala | 29 |
| 4 | MODELOS DE PROPAGAÇÃO | 31 |
| 4.1 | Propagação no espaço livre (<i>Free Space Loss</i>)..... | 32 |
| 4.2 | Propagação em ambientes urbanizados | 33 |
| 4.2.1 | Modelo de Okumura-Hata..... | 33 |
| 4.2.2 | Modelo COST 231 | 34 |
| 4.2.3 | Modelo SUI (<i>Stanford University Interim</i>) | 36 |
| 4.3 | Modelos de Propagação para Espaços com Predominância de Vegetação | 37 |
| 4.3.1 | Modelo de Weissberger..... | 38 |
| 4.3.2 | Modelos ITU-R (<i>Early ITU</i>) | 39 |
| 4.3.3 | Modelos Fitted ITU-R (FITU- R) | 39 |
| 4.3.4 | Modelo COST 235 | 40 |
| 5 | PADRÃO IEEE 802.11 | 41 |
| 5.1 | Arquitetura de Rede..... | 42 |
| 5.2 | IEEE 802.11 b | 43 |

| | | |
|-------|-----------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.3 | IEEE 802.11 a..... | 44 |
| 5.4 | IEEE 802.11 g | 45 |
| 5.5 | IEEE 802.11 n | 45 |
| 5.6 | IEEE 802.11 ac..... | 47 |
| 5.7 | IEEE 802.11 ah..... | 47 |
| 6 | AMBIENTE E CAMPANHAS DE MEDIÇÃO..... | 50 |
| 6.1 | Ambientes de Medição..... | 50 |
| 6.2 | Campanhas de Medição..... | 54 |
| 6.2.1 | Medição na Área de Vivência 1 | 55 |
| 6.2.2 | Medição na Área de Vivência 2 | 57 |
| 7 | ANÁLISE DOS DADOS E RESULTADOS..... | 58 |
| 7.1 | Caracterização Banda Estreita..... | 61 |
| 7.1.1 | Análise da Perda de Percurso | 62 |
| 7.1.2 | Variabilidade em Larga Escala..... | 64 |
| 7.1.3 | Análise da Perda de Propagação e Comparação com Modelos..... | 66 |
| 7.1.4 | Variabilidade em Pequena Escala | 77 |
| 8 | CONCLUSÕES..... | 87 |
| 8.1 | Sugestão de Trabalhos Futuros..... | 89 |
| 9 | BIBLIOGRAFIA..... | 91 |
| | ANEXO A - Código Desenvolvido para Caracterização Banda Estreita..... | 98 |
| | ANEXO B – Datasheets de Equipamentos | 112 |

1 INTRODUÇÃO

Para desenvolver um projeto de um sistema móvel é fundamental que medidas de propagação sejam realizadas a fim de que os níveis do sinal recebido sejam estimados em todo ambiente onde o sinal será propagado. Tal previsão abrange a estimativa do valor médio e da variância em torno da média e, para isso, é necessário modelar matematicamente o comportamento do sinal e os níveis de potência do sinal recebido em função da frequência utilizada, distância e outras variáveis que dependem especificamente do ambiente em estudo. Por conseguinte, para que haja a realização de projetos com mais eficiência para os sistemas de comunicações móveis é extremamente importante o conhecimento das características do canal de rádio propagação. Para tal, também há necessidade do conhecimento das sondagens do canal, processo pelo qual alguns parâmetros estatísticos sejam conhecidos com precisão, de modo que, descrevam o comportamento do sinal ao atravessar o canal de estudo.

A caracterização do canal de rádio propagação, através das técnicas de sondagens, tem-se modelos de propagação determinísticos, empíricos e semi-empíricos, os quais são amplamente utilizados para análise de perda de propagação em ambientes urbanos, suburbanos e rurais. Estes modelos de propagação devem apresentar resultados que se aproximem ao máximo da realidade.

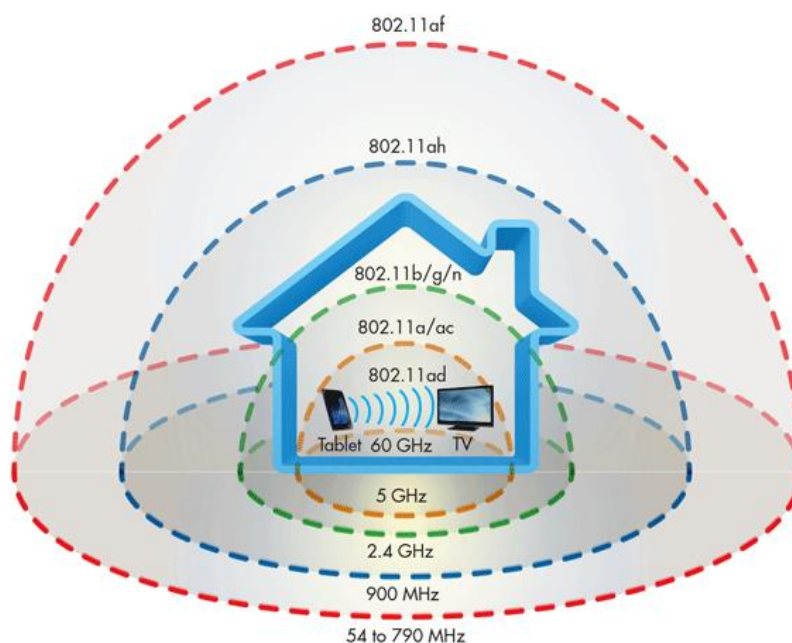
A sondagem do canal de rádio propagação pode ser realizado em banda estreita ou banda larga. As medições realizadas em banda estreita, com a transmissão de uma onda CW (*Continuous Wave*), conduzem principalmente à obtenção da estatística de potência recebida em cada ambiente. As medições feitas em banda larga, possibilitam a obtenção das características de multipercurso, através da resposta ao impulso do canal.

Em conjunto, estas análises descrevem completamente as características do canal de propagação rádio, possibilitando a obtenção de informações fundamentais para o projeto, otimização e planejamento dos sistemas rádio móveis, tais como: máxima taxa de transmissão de dados permitida, localização ótima para a instalação de antenas, separação mínima de frequências ou de tempo para efeito de diversidade em frequência ou no tempo, respectivamente, limiar de ruído dos sistemas digitais, dentre outros.

Todas as tecnologias de redes de comunicação sem fio precisam ter modelos de predição assertivos para diversos tipos de ambientes de propagação do sinal e diversas faixas de frequência. Muitos estudos têm sido realizados ao longo dos anos com esse objetivo, inclusive para tecnologias de redes locais sem fio que utilizam o padrão IEEE 802.11.x [1].

Este trabalho busca investigar o comportamento em banda estreita do sinal propagado em ambientes típicos de implantação de redes locais para áreas de vivência, praças e parques digitais como forma de beneficiar a comunidade e incluir digitalmente uma grande parcela da população que ainda carece de acesso à internet de qualidade. No Brasil, as praças e parques públicos são em geral imersos em ambientes com alta concentração de vegetação, essa característica é típica tanto nas cidades metropolitanas como nas cidades do interior. Assim, os estudos e análises propostas neste trabalho, serão realizados considerando ambientes com predominância de vegetação e em duas faixas de frequência utilizadas pelas principais versões do padrão IEEE 802.11, tais como a faixa de 2,4 GHz utilizada nas versões IEEE 802.11 (b, g, n) e a faixa sub-1GHz de 900 MHz utilizada na versão IEEE 802.11ah, versão ideal para ambientes outdoor devido a grande área de cobertura. A Figura 1 mostra as principais versões do padrão IEEE 802.11 e suas respectivas capacidades de cobertura.

Figura 1: Alcance e frequência dos padrões IEEE 802.11.



Fonte: Extraído de [2]

Estudos vem sendo realizados para caracterizar a perda de propagação de tecnologias IEEE 802.11 em diversos ambientes e cenários. Em [3] foi realizada a modelagem de perda de percurso indoor para o sistema 802.11g operando em 2,4 GHz. O autor examinou a influência dos multipercursos nas paredes internas de uma residência e validou o uso do modelo Multi-Wall-Floor para esse tipo de ambiente. Em [4] analisou-se a propagação na faixa de 2,4 GHz em região de altas temperaturas e umidades, neste caso foi elaborado

um modelo empírico adequado para esse tipo de ambiente. Vários outros trabalhos [5–10] investigaram a propagação em florestas, sendo a perda de percurso modelada empiricamente em [7, 9] e a caracterização banda estreita realizada em [5, 6, 9 e 10]. Em [11–12] também foram realizados estudos de sistemas IEEE 802.11 em ambientes florestais. Em [11] as medições foram executadas em 5,12 GHz e as caracterizações foram em banda estreita e banda larga com objetivo de examinar o comportamento em florestas densas. Em [12] foi feito um estudo da viabilidade de se utilizar usar o padrão IEEE 802.11a/b/g em ambientes florestais com interesse particular de localizar o habitat de morcegos. Em [13] foi investigado o desempenho da tecnologia Wi-Fi IEEE 802.11n na frequência de 5,18 GHz em uma das áreas rurais da Malásia, normalmente cobertas por densa folhagem tropical. Outros trabalhos de análise de tecnologia Wi-Fi em ambientes com vegetação foram realizados em áreas rurais utilizando sistemas IEEE 802.11.n nas faixas de 2,4 GHz [14] e 5,12 GHz [15]. Mais recentemente estudos de propagação na faixa de sub 1-GHz vêm sendo realizados para IEEE 802.11.ah. Em [16] o autor examina as características de rádio na faixa de 900 MHz e taxas de transferência de sistemas IEEE 802.11.ah em diferentes ambientes, incluindo superfícies marítimas, veículos aéreos não tripulados e túneis. Em [17] são avaliados sete modelos de perda de percurso, com base em uma campanha de medição suburbana em larga escala, incluindo linhas de visada e de não visada com implantações de altura de antena diferentes e iguais.

As pesquisas e investigações de características de canal em banda estreita com o padrão IEEE 802.11.ah estão ganhando importância, haja vista a recente mudança conceitual nas telecomunicações, com foco em soluções para comunicações diretas máquina a máquina (M2M), bem como no fornecimento de conexão à Internet para um número exponencialmente crescente de diferentes dispositivos "inteligentes" (IoT, do inglês *Internet of Things*). As análises prevêm que, até 2020, dezenas de bilhões de dispositivos diferentes serão conectados, como parte da rede da Internet das Coisas (IoT) [18]. Entretanto, ainda existem poucas investigações que envolvem o IEEE 802.11.ah em ambientes com predominância de vegetação.

A predição de perda de sinal devido à vegetação é difícil de se determinar devido ao grande número de variáveis envolvidas, como por exemplo: a altura, forma, a densidade e a distribuição das árvores, a distribuição angular das folhas e galhos. Há ainda que se considerar que a densidade da folhagem varia de acordo com a estação do ano. Nos modelos usuais de propagação a influência da vegetação na perda de sinal no percurso não é

considerada em suas equações ou se acha embutida nas mesmas, já que os modelos empíricos existentes foram obtidos de medidas realizadas em ambientes diversos, onde possivelmente havia alguma arborização. O que existe em termos de modelagem para o efeito da vegetação é específico para um determinado tipo de vegetação, em geral floresta densa, numa certa faixa de frequências, como visto anteriormente.

Portanto, é importante que seja realizado o estudo da propagação de sinais de rádio em ambientes de difícil acesso e em parques e praças públicas que têm permitido, através de redes locais sem fio, o acesso da população de baixa renda a tecnologias de ponta, reduzindo a divisão digital e promovendo a inclusão social.

De posse de modelos adequados para um canal de propagação, é possível desenvolver ferramentas de planejamento de cobertura e análises de interferências mais precisas e eficientes. Estas ferramentas são também essenciais para os projetistas de sistemas de redes locais sem fio, permitindo o dimensionamento adequado de seus pontos de acesso e repetidores de modo a garantir qualidade do sinal e as taxas de transmissão especificadas em projeto.

1.1 Objetivos

Tendo em vista o enorme crescimento de estudos sobre rádio de propagação móvel e seus fundamentos em conjunto com sua fundamental importância, tal trabalho pretende investigar os comportamentos das ondas eletromagnéticas propagadas em ambientes outdoor com predominância de vegetação de tal forma que se assemelhe a praças e parques públicos que sejam focos de inclusão digital através da implantação de redes de comunicação sem fio locais utilizando o padrão IEEE 802.11.x.

1.1.1 Objetivo geral

Caracterizar em banda estreita o canal de rádio propagação móvel nas faixas de 900 MHz e 2400 MHz em ambientes que se assemelhem ao de praças e parques públicos urbanos com predominância de vegetação, de forma compreender a influência da vegetação e conduzir aos melhores modelos de predição de cobertura nesse tipo de ambiente e nessas faixas de frequência.

1.1.2 Objetivos específicos

- ✓ Montagem de setups de transmissão e recepção experimentais para realizar medidas de banda estreita com a transmissão de uma onda CW, em região com predominância de vegetação, nas faixas de 900 MHz e 2400 MHz;
- ✓ Montar base de dados das medidas nas duas faixas de frequência que permitam relacionar a posição geográfica com o nível médio do sinal recebido e avaliar a atenuação com a distância em função dos mecanismos de propagação presentes;
- ✓ Utilizar ferramenta computacional MATLAB® para aquisição de dados durante as campanhas de medição e pós processamento dos dados medidos, para geração de estatísticas relacionadas aos parâmetros de perda de percurso, desvanecimento de larga escala e de pequena escala que permitam examinar a características do canal rádio propagação móvel em banda estreita.
- ✓ Desenvolver um ambiente de simulação para comparar os modelos de previsão de coberturas aplicáveis a tecnologia WIFI com os dados obtidos nas medições de 900 MHz e 2400 MHz.

1.2 Organização do Trabalho

O presente trabalho está organizado da seguinte maneira: O Capítulo 2 apresenta conceitos fundamentais do canal rádio móvel. Essa fundamentação traz concepções sobre os principais mecanismos de propagação que sofre a onda eletromagnética transmitida no canal rádio. O Capítulo 3 apresenta os principais efeitos de propagação que caracterizam o canal em banda estreita, tais como a perda de percurso e os desvanecimentos em pequena e larga escala. O Capítulo 4 apresenta os principais modelos de propagação de áreas urbanas e os principais modelos de predição específicos para ambientes com vegetação. Todos os modelos apresentados são utilizados para as análises e comparações com dados empíricos. No Capítulo 5 faz-se um resumo das principais versões do padrão IEEE 802.11.x, apresentando suas principais diferenças. O Capítulo 6 apresenta em detalhes os ambientes de medição, a estrutura e configurações dos setups de medição e os procedimentos adotados no planejamento das duas campanhas de medição. O capítulo 7 traz os resultados, comparações com modelos e respectivas análises. Por fim, o Capítulo 8 apresenta as conclusões e as sugestões de trabalhos futuros.

2 O CANAL DE RÁDIO PROPAGAÇÃO MÓVEL

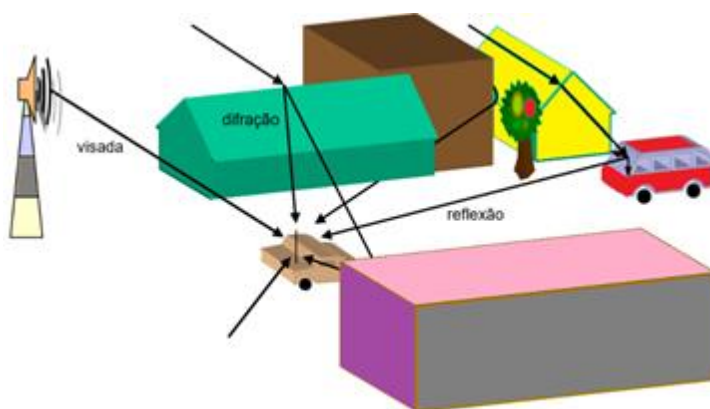
Em um sistema de comunicação, denominamos de canal o meio físico que conduz o sinal de informação transmitido até o receptor. Nos sistemas de comunicação sem fio, esse canal é a interface rádio e quando o transmissor ou o receptor estão em movimento esse canal é dito canal rádio móvel. Na interface rádio, as ondas eletromagnéticas são propagadas no ar a partir de uma antena transmissora e são recebidos por outra antena receptora, sendo que o sinal recebido sofre a influência de diferentes mecanismos de propagação, tais como reflexão, difração e espalhamento, provenientes dos obstáculos naturais e/ou artificiais que existem no caminho desde o transmissor até o receptor.

2.1 Mecanismos de propagação

Na maioria dos sistemas de comunicações móveis sem fio, as ondas eletromagnéticas quando propagadas no canal rádio sofrem desvanecimentos decorrentes da interação delas com os obstáculos encontrados em seu caminho. Esses obstáculos podem ser desde grandes edificações e relevos acidentados até pequenas folhagens de árvores em ambientes com vegetação. Devido a esses obstáculos as ondas eletromagnéticas percorrem o canal rádio através de diferentes mecanismos de propagação que são responsáveis pela perda média de propagação no canal rádio móvel e que determinam o nível médio do sinal recebido, sendo considerados no cálculo de enlace ou de cobertura.

Os mecanismos de propagação importantes em nosso estudo na faixa de UHF são a propagação em visibilidade, a reflexão, a difração e o espalhamento [19]. A Figura 2 ilustra estes principais mecanismos de propagação.

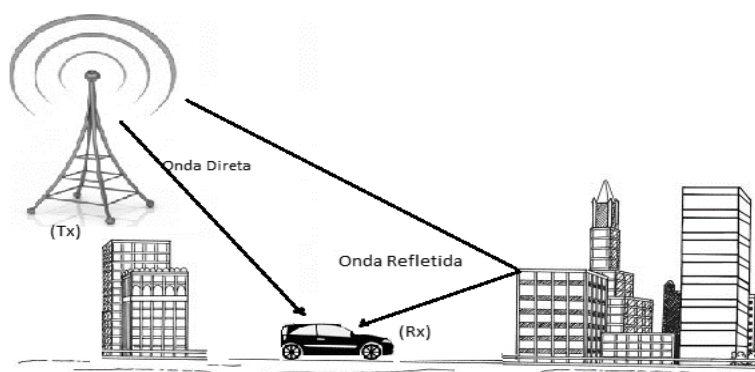
Figura 2: Mecanismo de Propagação



Fonte: Adaptado de [19].

A reflexão ocorre quando as ondas eletromagnéticas encontram uma superfície lisa e as dimensões lineares são grandes em comparação com o comprimento de onda com a da onda que se propaga. [20], [21]. Na Figura 3 ilustra-se o comportamento dessas ondas. A reflexão consegue degradar bastante o desempenho do sistema, pois dependendo de como o sinal refletido chega na antena receptora, se em fase ou fora de fase, em relação ao sinal direto, pode causar interferências construtivas ou destrutivas respectivamente [22, 23].

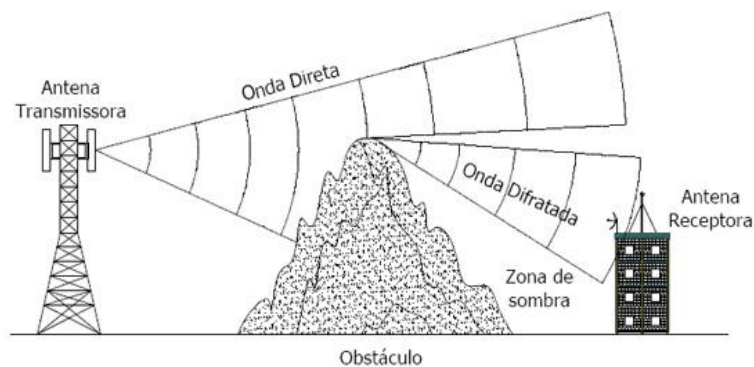
Figura 3: Representação do fenômeno de reflexão.



Fonte: Do Autor.

De acordo com [24], a difração é a capacidade de as ondas eletromagnéticas contornarem os obstáculos, permitindo que as ondas alcancem o receptor mesmo em áreas com sombra. Esse mecanismo é explicado pelo princípio de Huygens, que afirma que quando os pontos de uma abertura ou de um obstáculo são atingidos pela frente de onda eles tornam-se fontes de ondas secundárias que mudam a direção de propagação da onda principal, contornando assim o obstáculo. A Figura 4 ilustra o mecanismo da difração.

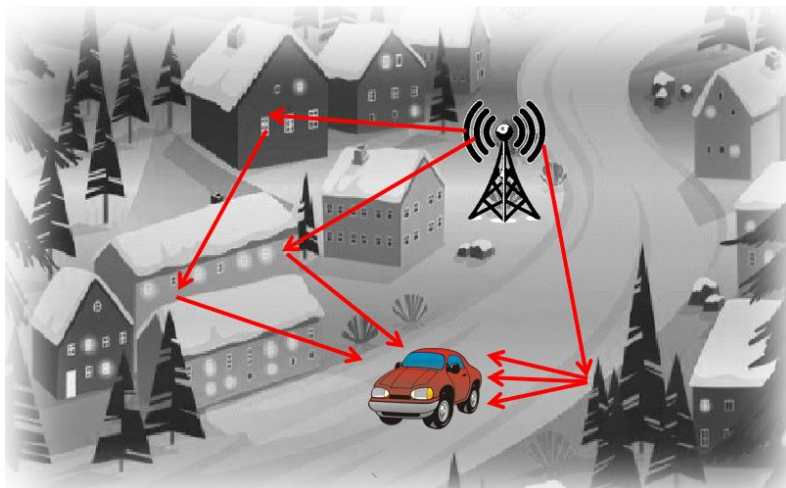
Figura 4: Representação do fenômeno de difração



Fonte: Adaptado de [25]

O espalhamento se dá quando uma onda eletromagnética incide contra uma superfície rugosa cuja rugosidade é comparável com o seu comprimento de onda ou quando incide em objetos com dimensões pequenas em relação ao comprimento de onda do sinal [26]. É um fenômeno ondulatório muito comum em canais de comunicação móvel onde a energia refletida é espalhada por todas as direções. A Figura 5 demonstra tal fenômeno.

Figura 5: Representação do fenômeno de espalhamento

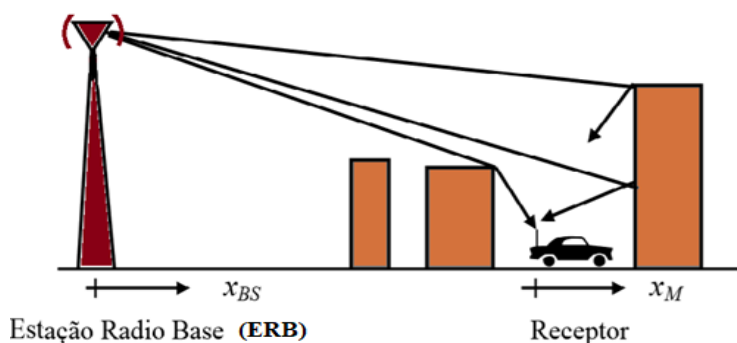


Fonte: Do Autor.

Esses mecanismos de propagação são responsáveis pelo aparecimento de um importante fenômeno conhecido como multipercurso. O fenômeno do multipercurso é o resultado das várias réplicas do sinal que atingem o receptor por percursos distintos.

Segundo [22], as fases e amplitudes aleatórias das diferentes componentes que atingem o receptor, provocam no sinal transmitido mudanças rápidas na sua intensidade em pequenas distâncias. Essa variabilidade do sinal é conhecida como de pequena escala, discutida no Capítulo 3. Na Figura 6, ilustra-se o fenômeno do multipercurso.

Figura 6: Propagação por Multipercursos



Fonte: Adaptado de [27]

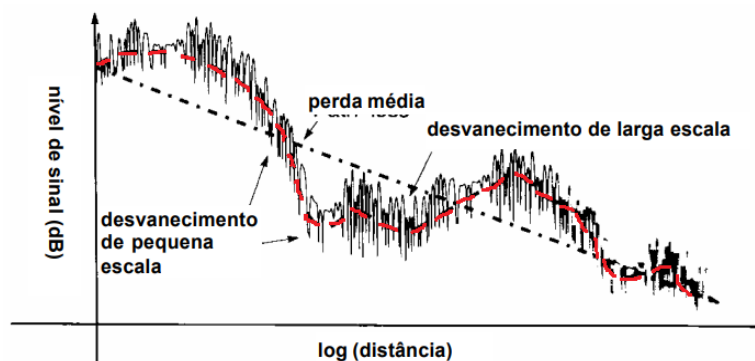
3 CARACTERIZAÇÃO EM BANDA ESTREITA

O canal rádio móvel tem natureza essencialmente aleatória e é considerado um processo estocástico que, portanto, precisa de um tratamento estatístico para que suas características sejam conhecidas. A caracterização do canal pode ser realizada em banda estreita e em banda larga. Em banda estreita, busca-se estimar como o sinal irá desvanecer e atenuar ao longo do caminho entre o transmissor e o receptor. Na caracterização em banda larga, busca-se obter a resposta ao impulso do canal variante no tempo e a partir dela obter parâmetros de dispersão temporal e espectral do sinal propagado. O conhecimento prévio das estatísticas do comportamento do sinal propagado num canal rádio móvel é de fundamental importância para dimensionar corretamente os serviços de comunicação sem fio existentes.

De acordo com [28], a caracterização do canal de propagação rádio em banda estreita, é essencial na determinação do tamanho das células, nível de interferência no receptor e na melhor localização das estações base. Conhecendo as estatísticas do desvanecimento em pequena e em larga escala do sinal propagado num certo ambiente, é possível implementar e desenvolver medidas adequadas para que a operação possa ocorrer dentro dos requisitos especificados em projeto, dentro da configuração mais adaptada ao ambiente.

O sinal que é recebido no receptor móvel é composto de três variações de potência conforme ele se distancia do transmissor. Estas três variações são a perda de percurso ou atenuação com a distância (*Path Loss*), o desvanecimento em larga escala e o desvanecimento em pequena escala. Em condições normais de operação de uma dada tecnologia de comunicação móvel, o receptor se distancia e se aproxima do transmissor de maneira aleatória e neste caso não conseguiríamos distinguir esses três efeitos. No entanto, se coletarmos de forma estruturada e instantânea a variação da potência do sinal de forma a apresentá-la em função do logaritmo da distância entre o transmissor e o receptor, verificaremos a existência dos três efeitos mencionados acima, conforme pode ser observado na Figura 7 apresentada a seguir.

Figura 7: Desvanecimentos em pequena e larga escalas



Fonte: Adaptado de [22]

Em geral, para caracterizar o canal em banda estreita deve-se conhecer a perda de percurso do sinal propagado, a variabilidade em pequena escala gerada pelo efeito dos multipercursos e a variabilidade em larga escala decorrente do efeito de sombreamento. Para isso normalmente transmite-se um sinal com largura de banda muito estreita, podendo ser uma portadora não modulada [29], cujo espectro de frequência se aproxima a de um impulso. Com base na potência do impulso capturado no receptor, é possível analisar os efeitos de propagação [30] contendo as flutuações do sinal em pequena e larga escala e a perda de percurso.

3.1 Perda de Percurso (*Path Loss*)

A perda de percurso (*Path Loss*) é a atenuação ocorrida na potência média do sinal devido a propagação no espaço livre, difrações e reflexões causadas pelos obstáculos presentes no canal quando o receptor se distancia do transmissor [28]. A aleatoriedade das alterações provocadas nos percursos influencia diretamente nas ondas eletromagnéticas originando então as perdas de potência e modificações na frequência em função dessa distância entre a antena de transmissão e a antena de recepção.

Em um ambiente rádio móvel, conforme a onda eletromagnética se afasta da antena transmissora, diminui a densidade de potência ou nível de sinal recebido, ou seja, a atenuação pode ocorrer mesmo no vácuo, pela abertura ou espalhamento da energia conforme a onda se propaga. Os modelos de predição indicam que a média do sinal recebido decai de forma logarítmica com o aumento da distância, ou seja, a atenuação com a distância se caracteriza por variações na intensidade do sinal em função da distância, calculada pelos modelos de predição de cobertura.

A atenuação com a distância é calculada em relação ao logaritmo da distância entre o transmissor e receptor em torno de centenas a milhares de metros.

A perda de percurso, que representa a atenuação do sinal como uma quantidade positiva, medida em dB, é definida como a diferença (em dB) entre a potência transmitida efetiva e a potência recebida, e pode ou não incluir o efeito dos ganhos da antena [22]. Uma vez incluído os ganhos das antenas, temos a seguinte equação:

$$PL(dB) = 10 \log \left(\frac{P_t}{P_r} \right) = -10 \log \left[\frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \right] \quad (3.1)$$

Onde:

P_t : potência transmitida;

P_r : potência recebida;

G_t : ganho da antena transmissora;

G_r : ganho da antena receptora;

d : distância de separação Tx – Rx em metros.

Na equação matemática, uma vez que na perda de percurso se exclui os ganhos das antenas, considera-se antenas como tendo um ganho unitário, tendo como modelagem a equação abaixo:

$$PL(dB) = 10 \log \left(\frac{P_t}{P_r} \right) = -10 \log \left[\frac{\lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \right] \quad (3.2)$$

A atenuação média ou perda de caminho médio para uma distância qualquer na separação entre o transmissor e receptor (T- R) é mostrada pelas equações 3.3 e 3.4, destacando um expoente de perda de percurso n , conforme a descrição a seguir:

$$PL(d)_{\infty} = \left(\frac{d}{d_0} \right)^n \quad (3.3)$$

Ou

$$\overline{PL}(dB) = \overline{PL} \log(d_0) + 10_n \log \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad (3.4)$$

Onde o expoente n representa a taxa com a qual a atenuação aumenta com a distância, d_0 é uma distância de referência ao transmissor (em metros), d é a distância entre transmissor e receptor (em metros) e $PL(d_0)$ é a atenuação de espaço livre.

Quando plotada numa escala logarítmica, a atenuação se aproxima de uma reta com ângulo de inclinação de $10n$ dB. O valor de n depende do cenário de propagação e possui valores típicos entre 2 e 5 [27], sendo igual a 2 quando a atenuação é no espaço livre e próximo a 5 em regiões densamente urbanizadas. Na tabela abaixo segue os valores comuns do fator de atenuação para os diferentes tipos de ambiente.

Tabela 1: Expoente de perda de percurso para diferentes ambientes.

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

Fonte: Extraído de [31]

Um procedimento desenvolvido por Erceg [32], a partir das Campanhas de Medições em campo, foi feito para determinação do fator de atenuação n , isso a partir das conclusões de que a perda de percurso global seja descrita por:

$$y = \alpha + Kx \quad (3.5)$$

Onde:

y : Representa a perda média de percurso;

a : Representa a perda de percurso numa distância de referência d_0 próxima do transmissor (geralmente 100 metros);

$K=10n$: Representa a inclinação da reta, sendo n o fator de atenuação procurado; e

x : É o logaritmo da distância em cada i -ésimo ponto onde o sinal foi medido.

No Capítulo 6, será descrita a metodologia para a determinação dos fatores de atenuação para as medições realizadas empiricamente e que serão aplicadas nesse trabalho.

3.2 Desvanecimento em Larga Escala

O desvanecimento é uma distorção que ocorre no sinal transmitido além da distorção já esperada devido à perda de percurso. É causado por variações do ambiente e dependente da relação entre os parâmetros do sinal transmitido (largura de banda e tempo de duração de Bit) e os parâmetros do canal de comunicação (comportamentos diferentes num mesmo tipo de ambiente) [33].

O desvanecimento em larga escala relaciona-se com a atenuação média do sinal com o aumento da distância entre transmissor e receptor, causado por obstáculos (naturais ou não), tais como elevações do terreno, construções, vegetação, entre outros, que se encontram no trajeto entre o transmissor e o receptor. Esse tipo de desvanecimento é também conhecido por sombreamento, pois relaciona-se com as obstruções naturais (relevo e vegetação) e construções, como casas e edifícios, que fazem com que o receptor fique em uma região de sombra eletromagnética (ou de nível de sinal bastante reduzido) quando há obstrução [34], [35].

Quando é obstruído, o sinal chega ao receptor basicamente através de difração e espalhamento, e a amplitude do sinal assim recebido segue uma função de distribuição de probabilidade Lognormal que corresponde a uma distribuição Gaussiana ou normal para o nível do sinal em dB [35]. A função de densidade probabilidade Lognormal é expressa por:

$$f_y(y_{dB}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{dB}} e^{-\frac{(y_{dB}-\mu_{dB})^2}{2\sigma_{dB}^2}} \quad (3.6)$$

Onde:

$$y_{dB} = 10 \log_{10} y;$$

y_{dB} = Variável aleatória representando as variações do nível da potência recebida;

μ_{dB} = Média e y expresso em decibéis;

σ_{dB} = Desvio padrão também expresso em decibéis.

Vale ressaltar que, por causa desses obstáculos, o desvanecimento de potência média do sinal ao longo do percurso ocorre uma vez que haja um longo deslocamento do receptor e essa condição de sombreamento bloqueie parcial ou completamente a linha de visão entre Tx e Rx. Logo, pode-se afirmar que o tempo de sombreamento está em função do tempo que o receptor leva para contornar o obstáculo referido [22].

3.3 Desvanecimento em Pequena Escala

Denomina-se desvanecimento em pequena escala aquele causado pelo comportamento dos componentes do sinal que chegam ao receptor, tais como espalhamento local do sinal em árvores, carros, pessoas, entre outros fatores. Em distâncias curtas, cerca de centímetros ou metros e, num curto intervalo de tempo, as diversas réplicas do sinal espalhado percorrem múltiplos percursos, logo tal comportamento é originado pela multiplicidade dos caminhos percorridos (efeito de multipercurso) atingindo a antena receptora com brusca mudança de amplitudes e fases e em retardos de tempos diferentes, causando efeitos construtivos e destrutivos na envoltória do sinal recebido. Lembra-se que, o termo “escala” tanto para pequena quanto para grande escala, refere-se inicialmente a distancias.

O desvanecimento em pequena escala, também denominado de desvanecimento rápido, devido ocorrer em intervalo de tempo muito curtos, possui comportamento aleatório que pode ser caracterizado por uma distribuição de Rayleigh quando não há visada entre transmissor e receptor. Entretanto, esse comportamento estatístico do desvanecimento em pequena escala é bem representado por uma distribuição de rice, quando há linha de visada entre transmissor e receptor [33].

Com base em [36], é possível obter as equações de Rayleigh e Rice respectivamente.

A Equação de Rayleigh

$$p_r(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.7)$$

A Equação de Rice

$$p_r(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2+r_s^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{rr_s}{\sigma^2}\right) \quad (3.8)$$

Onde:

$I_0(\cdot)$ = Função de Bessel modificada de ordem zero;

r_s = Parâmetro relativo à amplitude da componente dominante;

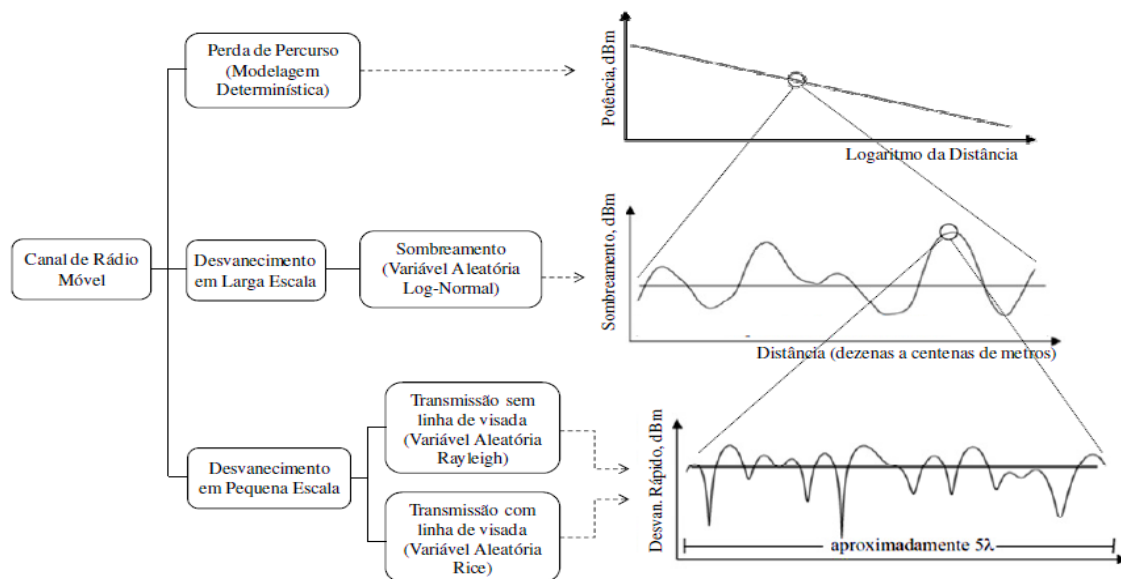
σ = Desvio padrão das componentes do sinal.

De acordo com [22], os principais fatores que contribuem de forma significativa para a ocorrência da atenuação em pequena escala além da propagação de multipercurso,

são: velocidade da estação móvel, velocidade dos objetos ao redor do receptor e a largura de banda de transmissão do sinal.

Ao se conhecer o comportamento do canal por suas distribuições e características, tanto na tendência natural de queda do nível da potência do sinal com a distância variando conforme o ambiente, quanto nos desvanecimentos em pequena e larga escala, apresenta-se de maneira simples e estruturada as variações ocorridas no sinal em um canal rádio móvel.

Figura 8: Comportamento do Canal Rádio Móvel



Fonte: Extraído de [20]

4 MODELOS DE PROPAGAÇÃO

O estudo da propagação das ondas eletromagnéticas se faz tão intenso atualmente que, além da obtenção do nível do sinal em um determinado local ou posição geográfica, pesquisadores têm proposto estudos de modelos de propagação adequados a diversos ambientes, pois os fatores que implicam na caracterização dos tais alteram significativamente o comportamento da propagação da onda eletromagnética e seus resultados obtidos [35], [37].

Um modelo de propagação calcula a perda média de propagação de um dado rádio transmissor viabilizando serviços para um ambiente qualquer, tendo também grande utilidade no planejamento de cobertura de um sistema para localização das estações rádio base.

A definição dos modelos de propagação do sinal se dá como um conjunto de expressões matemáticas, diagramas e algoritmos utilizados para representar as características de um rádio enlace que levam em consideração o ambiente [27] quer seja em construções urbanas, suburbanas e rurais, quer sejam em áreas com predominância de vegetação.

De acordo com a variedade dos modelos, tanto aqueles para ambientes internos (*indoor*) quanto para os de ambientes externos (*outdoor*), os mesmos podem ser agrupados em três grandes categorias: os determinísticos, realizados com equações e formulas tendo como base a teoria garantindo para muitos mais confiabilidade; os empíricos sendo vistos através das campanhas de medições feitas garantindo valores médios que podem ser comparados segundo recursos computacionais e os semi-empíricos que consegue unir os dados estatísticos com as teorias, mas nem sempre traz um resultado interessante. A Tabela 2 mostra a definição de maneira geral juntamente com suas vantagens e limitações.

Dos diversos modelos existentes, este trabalho usará como referência para comparação com dados medidos empiricamente, modelos consagrados, que são geralmente utilizados em predições de cobertura de áreas urbanas e modelos específicos para ambientes com predominância de vegetação. Após um longo estudo bibliográfico, optou-se em utilizar os seguintes modelos para analisar a perda ocorrida pela influência da vegetação: Modelo de Weissberg, Modelo Early ITU-R, Modelo Fitted ITU-R e Modelo COST – 235.

Tabela 2: Resumo dos principais tipos de Modelos de Propagação

| Tipos de Modelos | Descrição | Vantagens | Limitações |
|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Determinísticos ou Teóricos | Realiza o cálculo de cobertura de uma região através da teoria eletromagnética, ou a GDT- Teoria Geométrica da Difração e a UTD- Teoria Uniforme da Difração. Usa também a Técnica de Traçado de Raios ¹ . | Podem ser aplicados sem maiores restrições aos mais variados tipos de ambientes, quando suas características podem ser inseridas em simulações. | Implementar tais modelos exige recursos computacionais significativos em termos de tempo de processamento e memória para gerar essenciais informações. |
| Empíricos | Usam equações de ajuste de curvas construídas com base em resultados obtidos em uma ou mais regiões. | Melhor aplicados a regiões com as mesmas características das regiões onde foram realizadas as medições. Porém, adaptados aos ambientes com características distintas. | Não retratam fielmente qualquer outro ambiente de estudo, então no uso dos tais tenham ajustes de forma que se adequem ao ambiente. Não podem ser aplicados a regiões tão que gerem novas equações. |
| Semi-Empíricos | Mesclam a teoria e os dados estatísticos derivados da campanha de medições. | Oferece melhores parâmetros para sistemas de simulação. | Na maioria das vezes carece de detalhamento e precisão de informações. |

Fonte: Do Autor.

4.1 Propagação no espaço livre (*Free Space Loss*)

O modelo de propagação no espaço livre, foi um dos modelos a serem criados primeiro. Ele consiste em prever a atenuação com a distância em função da distância entre a antena de transmissão e de recepção, na ausência de qualquer obstáculo em sua visada juntamente com a frequência de operação. Não considera efeitos como reflexão, difração e espalhamento. A atenuação então é descrita pela fórmula [38]:

$$A_{prop}(dB) = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_t}{P_r} \right) = -10 \cdot \log_{10} \left[\left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 G_T G_R \right] \quad (4.1)$$

Onde:

P_t: Potência de transmissão;

P_r: Potência de recepção;

G_t: Ganho da antena de transmissão;

G_r: Ganho da antena de recepção;

λ: Comprimento de onda em metros;

d: Distância entre o transmissor e o receptor, em metros.

Se porventura, as antenas se apresentarem como isotrópicas, ou seja, $G_t=G_r=1$, o ganho é unitário, logo a atenuação devido à propagação no espaço livre se dá pela seguinte equação em decibéis:

$$A_0 = 32,45 + 20 \log(d)_{[m]} + 20 \log(f)_{[MHz]} \quad (4.2)$$

Onde:

A₀: Valor médio da atenuação no espaço livre devido ao caminho de propagação (dB);

f: Frequência da portadora;

d: Distância entre o transmissor e o receptor.

4.2 Propagação em ambientes urbanizados

Como dito anteriormente, neste trabalho optou-se em comparar os resultados obtidos em campanhas de medição com alguns dos principais modelos de propagação mais utilizados para ambientes urbanos, suburbanos e rurais. Alguns desses modelos serão discutidos a seguir.

4.2.1 Modelo de Okumura-Hata

Para melhorar computacionalmente o modelo de Okumura, Hata ajustou fórmulas matemáticas aos resultados dos gráficos de Okumura, elaborando um modelo de propagação que ficou conhecido como Modelo de Okumura-Hata.

Dentro dos limites estabelecidos por Hata, praticamente não há diferença entre os gráficos e as fórmulas correspondentes. Com este procedimento, o cálculo através de computador dos resultados de Okumura tornou-se extremamente simples. Vale ressaltar que, o equacionamento de Hata considera a atenuação básica mediana de propagação (A_b) que corresponde ao valor obtido acrescido da atenuação de espaço livre. De acordo com Hata [39] a faixa de frequências é de 150MHz a 1500 MHz Tem-se então para uma área urbana (A_{bu}).

$$A_{bu}(dB) = 69,55 + 26,16 \log f - 13,83 \log h_b - a(h_m) + (44,9 - 6,55 \log h_b) \log d \quad (4.3)$$

Onde:

f: Frequência em MHz;

h_m : Altura da antena da estação móvel;

h_b : Altura da antena da ERB (30 - 200);

d : Distância entre a ERB e a estação móvel em km (1-20).

A função $a(h_m)$ depende da altura da estação móvel. No caso a usual de $h_m = 1,5m$, esta tem função igual a zero. Para outros valores de h_m a função $a(h_m)$ é dada por:

- Cidades pequenas e médias.

$$a(h_m) = (1,1 \log f - 0,7)h_m - (1,56 \log f - 0,8) \quad (4.4)$$

- Cidades grandes

$$a(h_m) = 8,29(\log 1,54 h_m)^2 - 1,1, \text{ se } f \leq 300\text{MHz} \quad (4.5)$$

$$a(h_m) = 3,2(\log 11,75 h_m)^2 - 4,97, \text{ se } f \geq 300\text{MHz} \quad (4.6)$$

No que diz respeito a áreas suburbanas e rurais, tem-se para atenuação básica mediana de propagação:

- Área suburbana (A_s)

$$A_{bs}(dB) = A_{bu}(dB) - 2 \left[\log \left(\frac{f}{28} \right)^2 \right] - 5,4 \quad (4.7)$$

- Área rural (A_{br})

$$A_{br}(dB) = A_{bu}(dB) - 4,78(\log f)^2 + 18,33 \log f - 40,94 \quad (4.8)$$

O modelo de Okumura-Hata se assemelha ao modelo ITU-R utilizado para TV digital e produz resultados equivalentes. A função $A(hr)$, para ambientes suburbanos e rurais, é a mesma para o caso cidades médias e pequenas em ambientes urbanos.

4.2.2 Modelo COST 231

Uma das soluções adotadas na Europa para estimular o desenvolvimento técnico-científico envolvendo indústrias, institutos de pesquisa e universidade é conhecida pelo

nome de COST (*Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research*). Esta cooperação é realizada através de projetos específicos de interesses dos países que pertencem à união europeia. Nesta linha de ação, o Projeto COST 231 dedicou-se ao estudo da evolução das comunicações móveis terrestres, englobando aspectos do sistema rádio, dos problemas de propagação e de aplicações de faixa larga. Relativamente à parte de propagação, com base em medidas realizadas em diversas cidades europeias, houve um esforço considerável em desenvolver métodos de predição confiáveis.

Com objetivo de cobrir a faixa de 1,5 a 2,0 GHz, o projeto COST 231 realizou alterações na formulação empírica de Hata. De acordo com [40], o valor constante da fórmula original de Hata foi alterado de 69,55 para 46,3 e o fator de dependência com a frequência passou a 33,9. Além disso, foi acrescentado um novo fator (C_M) para tornar a expressão aplicável em áreas urbanas densas. Com tais modificações, a atenuação básica mediana de propagação é dada por:

$$A_{bu}(dB) = 46,3 + 33,9 \log f - 13,82 \log h_b - a(h_m) + (44,9 - 6,55 \log h_b) \log d + C_M \quad (4.9)$$

Onde:

- f : Frequência em MHz (entre 1500-2000);
- h_m : Altura da antena da estação móvel;
- h_b : Altura da antena da ERB (30 – 200 m);
- d : Distância entre a ERB e a estação móvel em km.

Para cidades pequenas e médias, tem-se as mesmas fórmulas de Okumura- Hata, ou seja,

$$a(h_m) = (1,1 \log f - 0,7)h_m - (1,56 \log f - 0,8) \quad (4.10)$$

Para cidades grandes, tem-se:

$$a(h_m) = 8,29(\log 1,54 h_m)^2 - 1,1, \text{ se } f \leq 300\text{MHz} \quad (4.11)$$

$$a(h_m) = 3,2(\log 11,75 h_m)^2 - 4,97 \text{ se } f \geq 300\text{MHz} \quad (4.12)$$

$C_M = 3\text{dB}$, para áreas urbanas densas e zero nos demais casos.

Para áreas suburbanas e rurais, tem-se:

$$A_{bs}(dB) = A_{bu}(dB) - 2 \left[\log \left(\frac{f}{28} \right)^2 \right] - 5,4 \quad (4.13)$$

Para áreas rurais, tem-se:

$$A_{br}(dB) = A_{bu}(dB) - 4,78(\log f)^2 + 18,33 \log f - 40,94 \quad (4.14)$$

4.2.3 Modelo SUI (*Stanford University Interim*)

Grupo de modelos de predição de propagação para sistemas fixos, proposto como padrão pelo próprio IEEE, para frequências abaixo de 11 GHz. Tais modelos ficaram conhecidos informalmente como “modelos SUI” (SUI – *Stanford University Interim*), pela participação da universidade de Stanford no seu desenvolvimento. A equação de perda básica é [41]:

$$L = A + 10\gamma \log \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_f + X_h + s \text{ para } d > d_0 \quad (4.15)$$

Onde:

d : Distância (m);

d_0 : Igual a 100 m;

h_b : Altura da estação rádio base acima do solo (m) ($10 \text{ m} < h_b < 80 \text{ m}$);

s : Fator de atenuação com distribuição log-normal que toma em consideração sombreamento por árvores e estruturas em geral.

Tipicamente, o valor de s está entre 8,2 e 10,6 dB, dependendo do tipo de terreno. A é calculado a partir de:

$$A = 20 \log \left(\frac{4\pi d_0}{\lambda} \right), \text{ onde: } \lambda = \frac{a - bh_b + c}{h_b} \quad (4.16)$$

Tabela 3: Constantes para Modelo SUI

| Constante | Terreno tipo A | Terreno tipo B | Terreno tipo C |
|-----------|----------------|----------------|----------------|
| A | 4,6 | 4 | 3,6 |
| B | 0,0075 | 0,0065 | 0,005 |
| C | 12,6 | 17,1 | 20 |

Fonte: Adaptada de [41]

Os termos X_f e X_h são fatores de correção para frequência e altura da antena do receptor acima do chão, respectivamente.

$$X_f = 6,0 \log\left(\frac{f}{2000}\right) \quad (4.17)$$

$$X_h = -10,8 \log\left(\frac{h_m}{2,0}\right) \text{ para terrenos tipo A e B} \quad (4.18)$$

$$X_h = -20,0 - \log\left(\frac{h_m}{2,0}\right) \text{ para terrenos tipo C} \quad (4.19)$$

Onde:

f : Frequência (MHz);

h_m : Altura do receptor (terminal remoto) acima do solo (m).

Os tipos de terreno são definidos da seguinte forma:

Tipo A – Montanhoso/densidade de árvores moderada a alta;

Tipo B – Montanhoso/densidade de árvores leve ou plano/ densidade de árvores moderada a alta;

Tipo C – plano/densidade de árvores leve.

4.3 Modelos de Propagação para Espaços com Predominância de Vegetação

Em espaços com predominância de vegetação em ambientes de interesse práticos como praças e parques digitais a modelagem da propagação de ondas eletromagnéticas é complexa. Tais ondas sofrem efeitos diversos como: absorção, espalhamento, atenuação, despolarização, como está em [42]. Esses efeitos traz um número expressivo de variáveis que traz dificuldade na modelagem pois causam não-linearidade e aleatoriedade. Tais variáveis podem ser as condições atmosféricas, frequência, altura das antenas, densidade da vegetação, morfologia das espécies, vegetais entre outros. Na literatura existe vários modelos utilizados para a compreensão da perda causada pela vegetação e alguns desses principais modelos serão mostrados ao longo desta seção[43]. Em geral, estes modelos são dados da seguinte forma:

$$L_{veg} = A * f^b * d^c \quad (4.20)$$

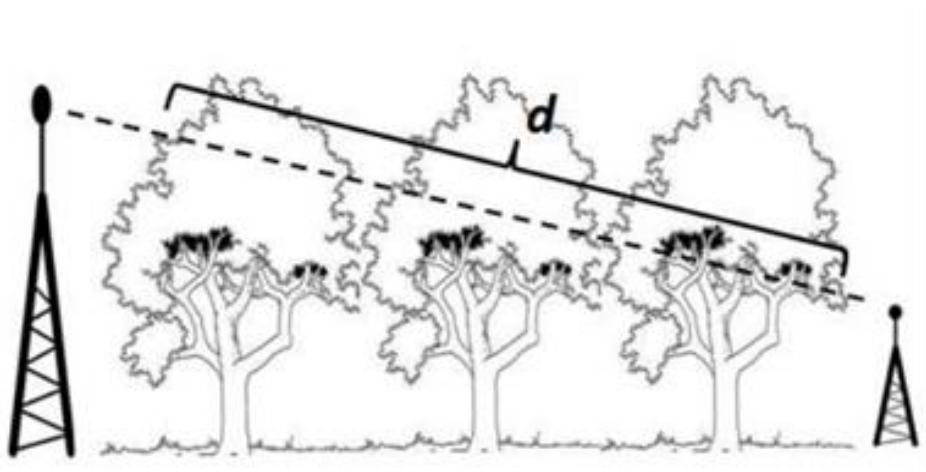
Onde:

L_{veg} é a perda causada pela vegetação e os parâmetros A , b e c são constantes calculadas empiricamente, dependentes do tipo de folhagem e densidade da vegetação.

4.3.1 Modelo de Weissberger

O modelo de propagação conhecido como exponencial modificado (MED, do inglês), foi proposto por Weissberger [44], em 1982, surgindo após a análise de modelos de decaimento exponencial na faixa de frequências entre 230MHz e 95 GHz e seus parâmetros empíricos foram determinados em campanhas de medições utilizando faixas UHF (400 – 700MHz). Esse modelo é válido para ambientes cuja vegetação possuem árvores com folhagem seca encontradas em climas temperados.

Figura 9: Distância (d) de Propagação em Árvores



Fonte: Extraído de [42].

A perda ocasionada pela vegetação nesse modelo é expressa por:

$$L(dB) = 0,45 f^{0,284} d, \text{ para } d \leq 14 \text{ metros} \quad (4.21)$$

$$L(dB) = 0,45 f^{0,284} d^{0,588}, \text{ para } 14 \leq d \leq 400 \text{ metros} \quad (4.22)$$

Sendo que a frequência f é GHz d é a distância entre o ponto de transmissão e recepção ao longo da vegetação é em metros.

Para o caso em que a propagação ocorre, principalmente através da copa das árvores, esse modelo é o mais apropriado.

4.3.2 Modelos ITU-R (*Early ITU*)

A Organização Internacional de Telecomunicações (ITU), desenvolveu um modelo a partir de campanhas realizadas principalmente com banda UHF para a perda devido à propagação em percursos com árvores [45]. Utilizou-se as mesmas técnicas de Weisberger, sendo que as suas profundidades de vegetação são inferiores a 400 metros e as frequências entre 200 MHz e 95 GHz [43]. Porém, essas variáveis não são especificadas, foram adotadas pelo Comitê Consultivo para rádio Internacional (CCIR), no final de 1986 [42]. Este modelo ficou conhecido como modelo Early ITU, expresso matematicamente por:

$$L(dB) = 0,2 f^{0,3} d^{0,6}, \text{ para } d \leq 400\text{metros} \quad (4.23)$$

4.3.3 Modelos Fitted ITU-R (FITU- R)

Após a Organização Internacional de Telecomunicações (ITU) ter desenvolvido o modelo de Early lançou um modelo que ficou conhecido como Fitted ITU-R (FITU-R), baseado em medições experimentais em 11 a 20GHz para profundidades de até 120 metros. Tal modelo foi proposto por Al- Nuaimi e Stephens, em 1998.

O modelo recomenda uma faixa de aplicação entre 10 a 40GHz sendo comparado com o modelo ITU-R baseado no ajuste de conjuntos diversos de medições através do uso do erro de mínimos quadrados produzindo um menor erro quadrático médio (RMSE) [46]. O modelo agora considera árvores sem e com folhas e a expressão da perda em excesso do sinal é calculada por:

$$L(dB) = 0,39 f^{0,39} df^{0,25}, \text{ para } \textit{árvores com folhas} \quad (4.24)$$

$$L(dB) = 0,37 f^{0,18} df^{0,59}, \text{ para } \textit{árvores sem folhas} \quad (4.25)$$

Sendo que f é em MHz e d é em metros, equivalentes ao dos modelos anteriores.

4.3.4 Modelo COST 235

A Cooperação em Ciência e Tecnologia (COST) desenvolveu um modelo conhecido como COST 235, em 1996 [47]. Os dados de referência do modelo foram obtidos sob diferentes condições para a folhagem, como o estado da folha e o tipo de árvore para uma faixa de frequência entre 9,6GHz e 57,6 GHz. Sendo a folhagem como parâmetro, as expressões matemáticas desses modelos são:

$$L(dB) = 15,6 f^{-0,009} d^{0,26}, \text{ com folhagem} \quad (4.26)$$

$$L(dB) = 26,6 f^{-0,02} d^{0,5}, \text{ sem folhagem} \quad (4.27)$$

Em relação aos outros modelos, o modelo COST 235 é diferente pois apresenta uma dependência lenta e inversa em relação a frequência. Pode-se afirmar então que, a confiança no modelo é duvidosa pois, em geral, a perda de propagação de ondas de rádio deve aumentar com a frequência.

5 PADRÃO IEEE 802.11

Nesse capítulo será abordado as definições do padrão IEEE 802.11.x [1]. Serão apresentadas de forma resumida as características e aplicações básicas das principais versões, dando ênfase aos princípios aplicados a versão IEEE 802.11 ah e suas características em relação aos padrões existentes, inclusive será citado o atual ciclo de desenvolvimento de tal padrão juntamente com suas futuras expectativas.

Em 1997, o IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*) divulgou as especificações do padrão IEEE 802.11, popularmente conhecido como Wi-Fi (*Wireless Fidelity*), que fazem parte da família de padrões 802, responsável por especificar padronizações para redes LAN e MAN [48], [49]. O grupo de trabalho do IEEE 802.11 definiu o detalhamento da camada física (PHY) e camada de enlace de dados. A camada física define as características mecânicas, elétricas, funcionais e os procedimentos para ativar, manter e desativar os meios físicos para a transmissão de bits. A camada Enlace de Dados é dividida em duas subcamadas: a subcamada MAC (*Medium Access Control*), para controle de acesso ao meio, e a subcamada LLC (*Logical Link Control*), para controle do enlace lógico [49]. O protocolo 802.11 original operava inicialmente operava na faixa de 2,4 GHz, com 11 canais sendo 3 canais não sobrepostos (1, 6 e 11) [50]. As taxas de transmissão alcançavam apenas 1 e 2 Mbps, utilizando o espectro de propagação por saltos de frequência (FHSS).

A partir deste protocolo outras especificações da família 802.11 foram desenvolvidas buscando melhorias de cobertura, taxa de transmissão e modulação. Atualmente, os padrões 802.11a, 802.11b, 802.11g, e 802.11n são conhecidos por todo seu suporte[49] [51], entretanto, há uma necessidade do constante desenvolvimento, tendo em vista as mais novas demandas tecnológicas para melhorar o acesso às redes sem fio. Mais recentemente foram homologados outros novos padrões da família 802.11, tais como, 802.11p, 802.11ac e 802.11ah.

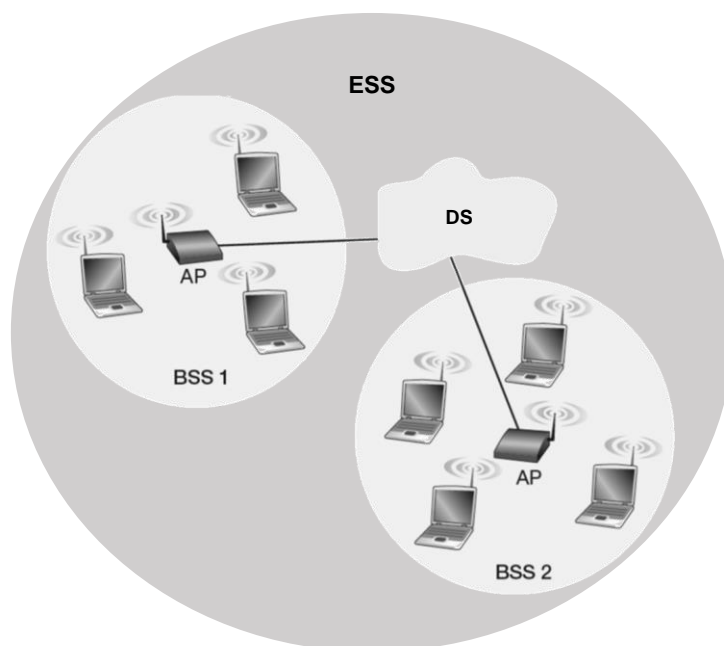
De maneira geral, cada um desses padrões difere por suas características e normas descritas e estabelecidas em diferentes situações e épocas. Essas principais características podem ser vistas nas diferenças das versões sobre a utilização da frequência, velocidade máxima alcançada e o alcance máximo da rede.

5.1 Arquitetura de Rede

A arquitetura de rede do padrão IEEE 802.11 é baseada na divisão da área coberta pela rede em células, denominadas de BSS (*Basic Service Set*). O raio da área de cobertura é definido pelo alcance do ponto de acesso AP (*Access Point*) que vai depender das características do ambiente, da potência de transmissão e da frequência utilizada. O AP é responsável pelo gerenciamento da comunicação por rádio com as STAs (*Wireless Lan Stations*) que são os usuários da rede nas mais diversas formas (celulares, tablets, notebooks, torradeiras, geladeiras, etc.) [51].

Para permitir a construção de redes cobrindo áreas maiores do que uma célula, múltiplas BSSs podem ser interligadas por meio de um sistema de distribuição DS (*Distribution System*). Esse conjunto de estações formado por várias BSSs interligadas pelo DS, define um conjunto de serviços expandidos ESS (*Extended Service Set*) [52].

Figura 10: Arquitetura 802.11



Fonte: Do Autor.

Em 802.11, cada Estação Sem Fio (STA) precisa se associar com um AP antes de poder enviar ou receber dados da camada de rede. Ao instalar um AP, um administrador de rede designa ao ponto de acesso um Identificador de Conjunto de Serviços, o SSID (*Service Set Identifier*) [53], composto de uma ou duas palavras. Ressalta-se que, os pontos de acesso possuem funções básicas, dos quais são autenticação, associação/reassociação, gerenciamento de potência e sincronização de rede, permitindo que uma estação

móvel mesmo saindo de sua célula de origem continue conectada à infraestrutura e não perca a comunicação. A função que permite manter a continuidade da comunicação quando um usuário passa de uma célula para outra, é conhecida como *Handoff* [54]. O gerenciamento de potência permite que as estações operem economizando energia, através de um modo chamado de Power Save. A Sincronização garante que as estações associadas a um AP estejam sincronizadas por um relógio comum.

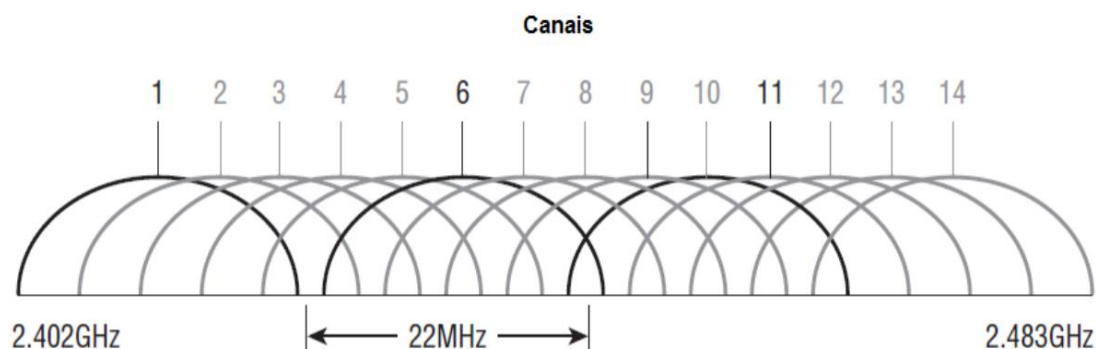
5.2 IEEE 802.11 b

Curiosamente o primeiro padrão aceito foi o 802.11b [55], surgindo em 1999 e não o IEEE 802.11 a. Isso porque o padrão 'a' levou mais tempo para ser finalizado e homologado. O padrão IEEE 802.11 b surgiu com o propósito de aumentar a taxa de transmissão de 1Mbps. Logo, tal padrão dispõe da taxa de transmissão sobre o meio aéreo de 11Mbps padronizado pelo IEEE, utilizando a faixa de frequências de 2,4 a 2,485 GHz do espectro não licenciado com modulação é o DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*). Usa canais de 22 MHz de largura de banda e os canais 1, 6 e 11 são normalmente utilizados por não haver sobreposição, conforme mostrado na Figura 11.

As vantagens desse padrão estão na largura de banda gratuita e sua disponibilidade mundial e ainda o baixo custo de seus equipamentos. Todavia, a desvantagem se dá pela alta interferência tanto na transmissão quanto na recepção do sinal.

De maneira geral, o padrão 802.11b, por ter equipamentos compatíveis com o padrão 802.11 original, demonstrando um rápido crescimento, baixo custo de equipamentos e características de propagação inerentes a faixa de 2,4GHz. Por conseguinte, tornou-se o padrão Wi-Fi principal e foi adotado amplamente.

Figura 11: Disponibilidade dos canais no padrão 802.11b

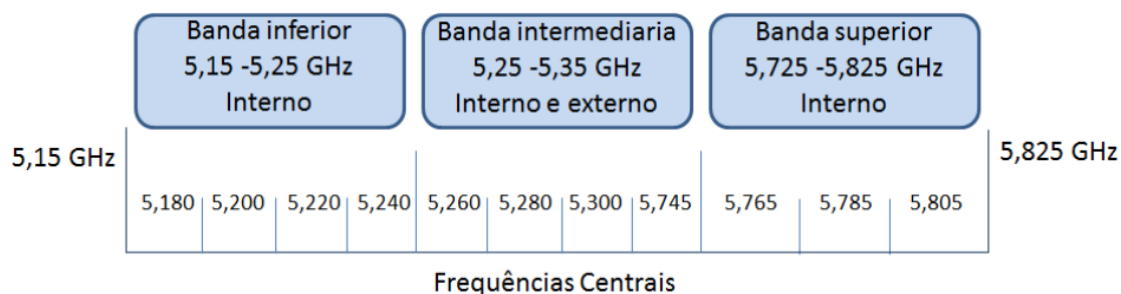


Fonte: Extraído de [51].

5.3 IEEE 802.11 a

Desenvolvido quase que em conjunto com o padrão 802.11 b, o chamado 802.11a, [56] disponível também em 1999, foi o primeiro a operar em uma faixa de frequência de 5 GHz que inicialmente suporta 64 usuários por ponto de acesso contra 32 usuários do IEEE 802.11 a. A faixa utilizada vai de 5,15 até 5,825 GHz divididas em 3 bandas conforme mostrado na Figura 12 para uso nos ambientes indoor e outdoor. Os canais são de 20 MHz utilizando sinais OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) com 52 subportadoras, sendo que 4 são usadas para controle de erro.

Figura 12: Distribuição das frequências de acordo com a aplicação



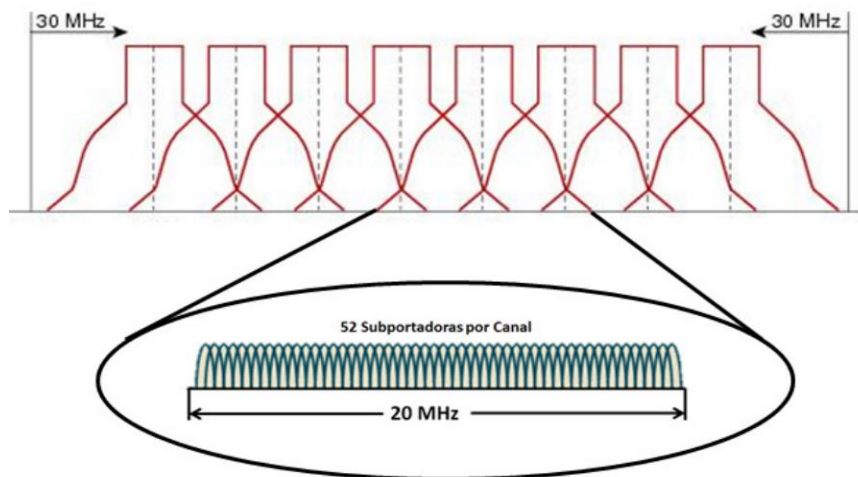
Fonte: Extraído de [51].

A técnica OFDM permite trafegar a informação em pequenos grupos de dados que são simultaneamente transmitidos com variações de frequências, impedindo que uma interfira na outra. Sua taxa de transmissão compreende até 54Mbps e, de 72 a 108 Mbps por fabricantes não licenciados [51]. Devido a frequência de 5GHz e modulação OFDM, essa versão possui oito canais não sobrepostos, [55] conforme visto na Figura 13.

Apesar de oferecer maiores taxas de transmissão de dados, seu aspecto negativo está na incompatibilidade em relação aos pontos de acesso com os padrões b e g.

Essa versão teve visibilidade maior em 2001, mas sua aceitação foi muito baixa devido ao grande sucesso do padrão 802.11b que ofereceu menores custos de fabricação [55] e maior área de cobertura com menores perdas de penetração devido a faixa de frequências mais baixa.

Figura 13: Padrão 802.11 a – Estrutura de canais



Fonte: Extraído de [56].

5.4 IEEE 802.11 g

Em junho de 2003, visando desenvolver o aumento de velocidade e taxas de transmissão superiores, outro padrão denominado 802.11g [57] foi consolidado. Através da técnica de modulação OFDM juntamente com DSSS, a taxa de transmissão dessa versão pode chegar até a 54 Mbps em boas condições de propagação. A faixa de 2,4GHz agora com canais de 20 MHz [52], também utilizando sinais OFDM com 52 subportadoras, passou a ter capacidade de até 1,038 Mbps por portadora [51]. A versão 802.11g, até o ano de 2010 foi bastante utilizado obtendo a maior parte das entregas equipamentos e sendo rapidamente popularizado por toda interligação com o padrão 802.11b.

5.5 IEEE 802.11 n

Em janeiro de 2004, o IEEE começou a desenvolver um novo padrão com objetivos de atingir maiores velocidades de transmissão de dados. O primeiro acordo com as indústrias fornecedoras foi em 2006, onde continha informações de orientação com base em um rascunho, o draft, sobre as linhas de produção. Em 2007, iniciou-se a fabricação dos componentes através dessa versão preliminar. Entretanto, os equipamentos que chegaram antes do lançamento do padrão IEEE 802.11n [58], no mercado, poderiam não ser incompatíveis com a sua versão final e, somente os equipamentos que foram projetados no rascunho 2.0 seriam compatíveis com esse padrão. Alguns podem necessitar de um upgrade de firmware para conseguir ser inteiramente compatível com esse padrão. Esta

versão foi certificada e consolidada através do Wi-Fi Alliance¹ em 2007, embora sua evolução tenha chegado até 2009, com a versão conhecida como draft 11.0. Desde então, o IEEE 802.11n tem-se estabelecido como um dos padrões Wi-Fi mais aceito, em função de seus atributos de compatibilidade, altas taxas de transferência e largura de banda.

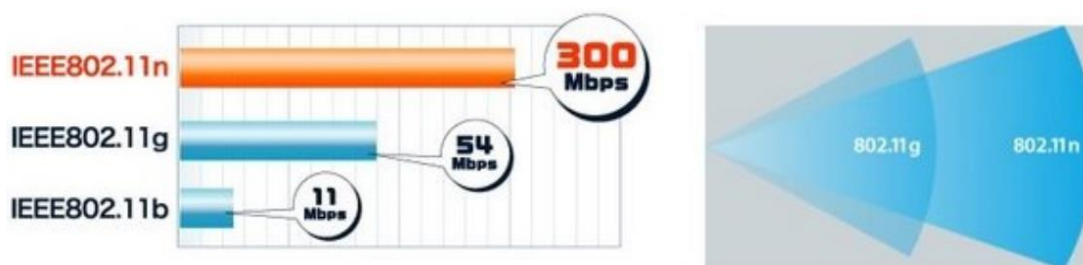
O padrão 802.11n opera na frequência de 2,4GHz e/ou 5GHz, [51] utilizando canais com 40 MHz de banda, permitindo duplicar, praticamente, as taxas de transferência por canal, dessa maneira, os canais podem ser configurados como 20MHz, 40MHz, ou conversão automática de 40/20 MHz, onde 2 canais adjacentes, sem superposição de 20 MHz se combinam para formar um único canal de 40 MHz.

Na presença de interferências, os canais que operam em 40MHz com conversão automática podendo retornar para 20 MHz. Na banda de 2,4 GHz, podem existir apenas 3 canais de 20 MHz que não se superpõem, atingindo até 288,9 Mbps. Na banda de 5GHz os resultados são ainda maiores, chegando a taxa expressiva de 600 Mbps. Importante ressaltar que no mesmo canal de 20 MHz é dividido em 56 portadoras com a mesma taxa individual e, com canais de 40 MHz, chega-se até 114 subportadoras.

Para que esse objetivo tenha sido alcançado, foram necessárias alterações nas camadas de rede PHY e MAC significativas. Essa versão está adicionada ao método de transmissão Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) – OFDM, [54] o transmissor e antenas do receptor conseguem o aumento de transferência de dados com a escala de multiplexação e o aumento do espaço.

O padrão IEEE 802.11 n além de muito mais rápido, ele dispõe de um alcance muito superior aos padrões anteriores.

Figura 14: Diferença de velocidade entre os padrões de rede b, g e n.



Fonte: Extraído de [59].

¹ Wi-Fi Alliance - É uma organização sem fins lucrativos que promove a tecnologia Wi-Fi e certifica produtos Wi-Fi se estiverem em conformidade com determinados padrões de interoperabilidade.

5.6 IEEE 802.11 ac

Iniciado em 1998, mas tendo suas especificações acontecidas até 2013 e aprovado apenas em 2015, o IEEE 802.11ac [60] dispõe de taxas nominais maiores, com velocidade de até 1 Gbps e padronizado em 1,3 Gbps, velocidade máxima para esse padrão na utilização de três antenas. Opera na faixa de 5GHz onde há menos interferências, sendo que, cada canal dentro dessa faixa, pode ter, por padrão, largura de banda obrigatória de 80 MHz (20, 40, 80) e 160 MHz, opcional(160 e 80 + 80).

Essa nova especificação utiliza múltiplas conexões de alta velocidade para transferir conteúdo em vez de propagar as ondas de modo uniforme para todas as direções, de modo simples chega a 433Mbps. No entanto, através de múltiplas antenas, no máximo oito, tal padrão tem capacidade de superação chegando a 6Gbps. Ressalta-se que os roteadores Wi-Fi reforçam o sinal para os locais onde há conexão de computadores.

As técnicas que o padrão 802.11 ac traz é a possibilidade de conversar simultaneamente com diversos aparelhos conectados ao roteador sem qualquer interrupção, ou seja, há comunicação por vários terminais através do esquema MU-MIMO (Multi-User MIMO), onde suas frequências se colaboram [49]. Além disso, um método optativo de transmissão deste padrão é o Beamforming (conhecido com TxBF) [54], permitindo que o aparelho que transmite avalie a comunicação com o outro dispositivo para otimização da transmissão em sua direção. Por mais rápido que o padrão IEEE 802.11 n fosse, ele só permitia que essa conversa fosse feita com um dispositivo por vez. Com essa tecnologia do padrão 802.11ac, há uma potencial economia de energia nos dispositivos móveis.

5.7 IEEE 802.11 ah

Nos últimos anos o mercado global de telecomunicações teve de buscar soluções de comunicação eficazes e econômicas para aplicativos baseados em IoT e M2M, para muitas aplicações. Em busca de uma solução de comunicações sem fio de baixa potência e ampla faixa de dados, a WiFi Alliance começou o trabalho de fornecer uma solução de rede local sem fio (WLAN) de alcance estendido. Assim, em 2010, eles organizaram o trabalho através do grupo de padronização IEEE 802.11ah, [61] com o objetivo de projetar o primeiro padrão WLAN sub-GHz.

A versão IEEE 802.11ah, aprovado em 2016, é a versão atual que define normas para um sistema de *Wireless Local Area Network* (WLAN) operando em frequências, isenta de licença, abaixo de 1GHz, chamada rede sub-1GHz, utilizada na implantação de larga escala. Logo, a principal vantagem dessa versão, se comparado aos padrões antecessores, está em trabalhar abaixo das frequências já vistas (2,4 e 5GHz) causando alívio de tráfego nas bandas já existentes, a capacidade de suportar milhares de estações por ponto de acesso e a maior área de cobertura.

Ao contrário dos outros padrões IEEE 802.11 (a, b, g, n, ac) que operam nas bandas de frequência de 2,4 GHz e 5 GHz e são otimizados para um número limitado de dispositivos de alta taxa de dados, o 802.11ah suporta redes com um grande número de dispositivos trabalhando com baixas taxa de transmissão e usando os benefícios de propagação na faixa de sub-1GHz. Por exemplo, um sistema IEEE 802.11ah trabalhando em 900 MHz pode ter uma redução de perda de potência do sinal propagado de cerca de 24,5dB, quando comparado com o sistema IEEE 802.11n, operando em 2.4GHz [61].

O protocolo do IEEE 802.11ah de camada sem fio PHY e MAC de baixa potência, foi projetado para ofertar comunicação em distâncias de até 1km entre as estações. A taxa de dados é flexível e em curtas distâncias pode chegar até 150Mbps [2], o que torna o padrão adequado para comunicações de Machine to Machine (M2M) e Internet das Coisas (IoT).

Na maioria das aplicações de M2M e IoT, os dispositivos geram tráfego com baixa taxa de dados, todavia, o número de dispositivos conectados a um único AP é muito grande. Assim, o grupo de trabalho IEEE 802.11ah buscou especificar uma rede que permita a conexão de até 6000 dispositivos em um único AP, com alcance de comunicação de até vários quilômetros e taxas de dados de pelo menos 100kb/s, [62].

De maneira geral, com as aplicações do Wi-Fi sendo crescentes exponencialmente por todo mundo, tendo como futuras projeções como M2M, IoT e Smart Grids, as características do padrão IEEE 802.11ah [2] se tornam facilitadoras para essas aplicações seja na maior penetração de ondas ou alcance maior das redes ou o retorno do baixo custo na fácil instalação, manutenção e suporte, se tornando o melhor, em comparação com os atuais, no desenvolvimento das redes sem fio. Resumidamente, o padrão 802.11ah é

baseado na tecnologia OFDM, que herda os recursos básicos dos padrões 802.11ac/n. O objetivo do IEEE 802.11ah é oferecer uma solução robusta e eficiente para as necessidades de aplicativos baseados em M2M e IoT, suportando um grande número de dispositivos com baixa taxa de dados permitindo um alcance de transmissão muito maior usando os benefícios de propagação de operação no espectro sub-1-GHz, larguras de banda de canal flexível (de 1MHz até 16MHz), esquemas robustos de modulação e codificação (MCS), acesso médio curto controle (MAC), aumento do tempo de suspensão, tempo de ativação desejado [61].

Essencialmente, pode-se afirmar que, a mudança entre os padrões está em suas características de conexão, não necessitando fielmente da criação de nenhum protocolo específico para a comunicação de redes sem fio pela tecnologia Wi-Fi, sendo possível a viabilidade de utilização de ambos os padrões. Na tabela 4, mostra-se um resumo sobre os padrões citados nesse capítulo.

Tabela 4: Características dos Padrões Wi-Fi:

| Especificação | 802.11 | 802.11a | 802.11b | 802.11g | 802.11n | 802.11ac | 802.11ah |
|--------------------------|---------------|----------------|----------------|--------------------|--------------------|----------------------|-----------------|
| Aprovação | 1997 | 1999 | 1999 | 2003 | 2009 | 2015 | 2016 |
| Taxa máx. de transmissão | Até 2Mbps | 54 Mbps | 11 Mbps | 54 Mbps | 600 Mbps | 6 Gbps | 150 Kbps |
| Modulação | FHSS | OFDM | CCK – DSSS | CCK – DSSS ou OFDM | CCK – DSSS ou OFDM | OFDM 256QAM, MU-MIMO | OFDM |
| Frequência (GHz) | 2,4 GHz | 5 GHz | 2,4 GHz | 2,4 GHz | 2,4 ou 5 GHz | 5 GHz | 900 Mhz |
| Largura do canal (MHz) | 1MHz | 20 MHz | 20 MHz | 20 MHz | 20 ou 40 MHz | 80 / 160 MHz | 1 a 16 MHz |

Fonte: Adaptada de [49]

Sendo assim, para todas as versões acima citadas, faz-se extremamente importante enfatizar que a apresentação da tecnologia Wi-Fi está baseada no padrão 802.11 e, que não necessariamente todo produto que trabalhe com essas especificações seja também Wi-Fi. Para isto, o produto necessita de um selo dado através de uma avaliação e certificação pela *Wi-Fi Alliance*, garantindo a interoperabilidade e que as normas de funcionalidade sejam seguidas, ou seja, os dispositivos não funcionarão sem os seus devidos selos.

6 AMBIENTE E CAMPANHAS DE MEDIÇÃO

Este capítulo descreverá em detalhes os ambientes com predominância de vegetação onde foram realizadas as campanhas de medição e obtenção de dados empíricos para análises. Também será discutido em por menores, como ocorreu cada campanha de medidas, a apresentação dos setups de transmissão e recepção e as características dos equipamentos envolvidos.

6.1 Ambientes de Medição

Este trabalho buscou analisar o comportamento da perda de propagação em ambientes que possam servir de parques ou praças digitais. No Brasil, normalmente esses ambientes possuem significativa predominância de vegetação, principalmente árvores e arbustos [43]. Para a realização das medidas, foi escolhido como ambiente de medição duas áreas de vivência do campus da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio) que fica localizado no bairro Gávea. As duas áreas de vivência escolhidas possuíam inúmeras árvores e arbustos, pistas, bancos e mesas de concreto, além de uma área de circulação de carros e estacionamento.

De forma a se assemelhar ao máximo com um sistema de redes locais sem fio padrão IEEE 802.11, colocou-se a antena transmissora a cerca de 6 metros do solo, com altura equivalente ao *Access points* instalados em árvores. Para as frequências utilizadas, a área de cobertura do sistema irradiante ultrapassava o tamanho das áreas de vivência escolhidas e, portanto, foi possível andar por toda a extensão das áreas de vivência fazendo coleta de dados empíricos a partir de um sistema de medição que será descrito em detalhes a seguir.

A Figura 15, apresenta uma visão aérea do perímetro da PUC-Rio, as duas rotas de medição executadas e a posição exata das áreas de vivência em destaque vermelho, onde as medições foram realizadas. A primeira área de vivência, que passaremos a chamar de Área de Vivência 1, está localizada atrás do edifício Kennedy e ao lado da Vila dos Estudantes. Esta área de vivência possui muitas árvores altas com caules grossos e muita folhagem. Esta configuração de vegetação se estendia até o final da área de vivência próxima a saída da PUC-Rio que dá acesso à Rua Marquês de São Vicente, onde existia um estacionamento atrás de um relevo acidentado cercado por muita vegetação e que ficava numa área totalmente sem visada com o transmissor, configurando uma região de sombra.

A Área de Vivência 1 também possuía um estacionamento, mas que no momento das medições não possuía muitos carros estacionados.

Figura 15: Distância (d) de Propagação em Árvores



Fonte: Do Autor.

A segunda área de vivência, que aqui passará a ser chamada de Área de Vivência 2, ficava em frente ao prédio Cardeal Leme, ao lado da escola de negócios da PUC - IAG. Essa área de vivência tinha uma característica que se assemelhava mais as praças públicas, pois possuíam além de muita vegetação, bancos e mesas de concreto, contendo também uma área para atrações artísticas e culturais e uma pista de rolagem para veículos automotores ao seu redor.

As Figuras 16 e 17 mostram vários ângulos das Áreas de Vivência 1 e 2 respectivamente.

Figura 16: Imagens da Área de Vivência 1 – Ambientes de Medidas



Fonte: Do Autor.

Figura 17: Imagens da Área de Vivência 2 – Ambientes de Medidas



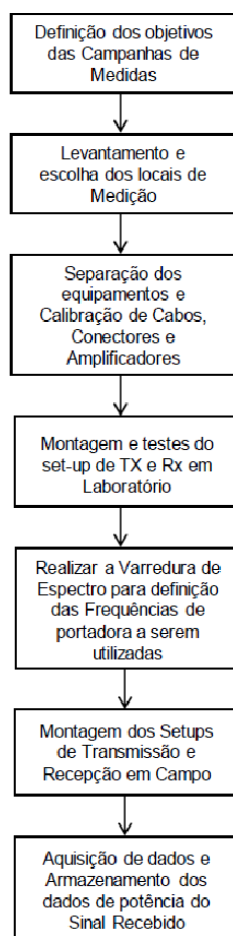
Fonte: Do Autor

6.2 Campanhas de Medição

Foram realizadas, portanto, duas campanhas de medição, uma em cada Área de vivência apresentada. A primeira campanha de medidas ocorreu em novembro de 2018 na Área de Vivência 1 em 2400 MHz e a segunda em agosto de 2019 na Área de Vivência 2 em 900 MHz e em 2400 MHz.

As primeiras medições na Área de Vivência 1 tiveram como objetivo de coletar dados de banda estreita e banda larga para as caracterizações distintas do canal rádio neste ambiente. As medições na Área de Vivência 2 tiveram objetivos de caracterizar o canal rádio apenas em banda estreita. Devido aos objetivos diferentes das duas campanhas de medição, foi necessário o uso de equipamentos diferentes nas duas etapas. Apesar de terem sido montados setups de medição diferentes, o planejamento e execução de ambas medições em banda estreita seguiu os mesmos procedimentos orientados em [28] e que está resumidamente ilustrado no fluxograma da Figura 18.

Figura 18: Distância (d) de Propagação em Árvores



Fonte: Adaptado de [28]

Na etapa de varredura de frequências, observou-se que a faixa de 2400 MHz encontrava-se praticamente toda congestionada. Desta forma optou-se por usar a portadora em 2500 MHz, onde nenhum sinal interferente afetava o sinal de testes. Já na faixa de 900 MHz foi possível transmitir o sinal de teste da portadora exata de 900 MHz.

Portanto os resultados e as suas análises serão todas apresentadas considerando as frequências de 900 MHz e 2500 MHz.

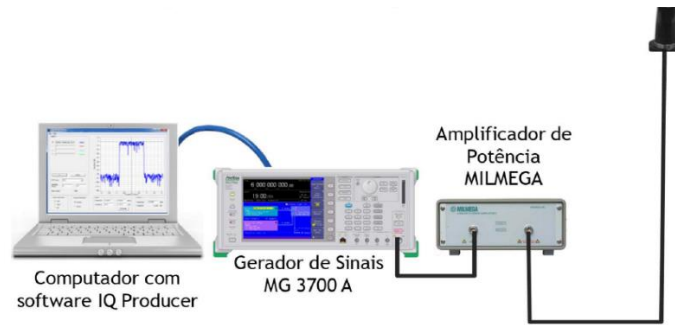
6.2.1 Medição na Área de Vivência 1

Na Medição na Área de Vivência 1, pela necessidade de se adquirir dados também em banda larga, foi utilizado nos setups de transmissão e recepção, o Gerador Vetorial de Sinal MG3710 A da ANRITSU [63] e o Analisador Vetorial de Sinais MS2692 A da ANRITSU [64] para transmissão e recepção do sinal, respectivamente.

Na etapa de caracterização banda estreita das medições, e de interesse deste trabalho, o sinal de teste transmitido foi apenas uma onda CW não modulada. No Transmissor foram utilizados cabos, conectores, um amplificador de potência Milmega AS0204-7 [65] e uma antena Omnidirecional MGRM-WLF-1C-10 [66] montada no teto da unidade móvel de medições da PUC-Rio. Os cabos e conectores foram devidamente caracterizados para conhecimento das perdas nestes componentes. Foi traçado uma curva de calibração do amplificador de potência para aplicação da potência correta na entrada do amplificador de forma a não saturar a saída. A estrutura do setup de transmissão e os parâmetros calculados e aplicados nos equipamentos estão apresentados na Figura 19, a Curva de Linearidade do Amplificador Milmega está apresentada na Figura 20 e as informações da antena de transmissão está apresentado na Figura 21. Todas as demais informações técnicas dos equipamentos envolvidos tanto nos setups de transmissão como de recepção estão apresentados na forma de *Data-Sheets* no ANEXO I deste trabalho.

Para a recepção do sinal CW transmitido, uma outra viatura foi equipada com outra antena omnidirecional MGRM-WLF-1C-10, um amplificador de baixo ruído [67], alimentado por uma fonte de corrente contínua, que acrescentava mais 33 dB ao sinal recebido, um GPS modelo GPSMAP 62 GARMIN [68] para georreferenciamento do sinal recebido e um Analisador Vetorial de Sinais MS2692 A que permitia, juntamente com um programa desenvolvido em MATLAB, a captura e armazenamento das componentes de fase (I) e quadratura de fase (Q) do sinal transmitido pelo Gerador Vetorial.

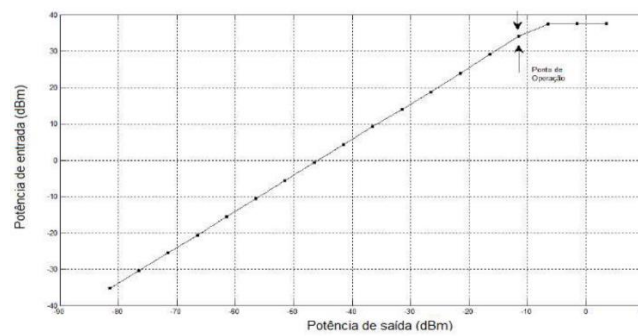
Figura 19: Estrutura do Setup de Transmissão



| Parâmetros | Valor |
|----------------------------------------|----------|
| Potência de Saída do Gerador de Sinais | -15 dBm |
| Frequência de Transmissão | 2500 MHz |
| Ganho do Amplificador de Potência | 46 dB |
| Ganho de Antena de Transmissão | 3 dBi |
| Perdas nos Cabos e Conectores | 3 dB |
| EIRP calculada | 31 dBm |

Fonte: Do Autor

Figura 20: Resposta do amplificador Milmega AS0204-7.



Fonte: Retirado de [28]

Figura 21: Informações técnicas da antena utilizada no setup de transmissão

Imagem da Antena Onnidirecional MGRM-WLF-1C-10

Especificações da Antena

| | |
|----------------------------|-----------------------------------------------------|
| Fabricante | Mobile Mark, Inc. |
| Descrição do produto | Antena de montagem magnética 694-894/1700-2700 |
| Faixa de frequência | 694-894 MHz e 1700-2700 MHz |
| Ganho | 3 dB |
| Máxima potência de entrada | 35 Watts |
| Tamanho e montagem | 2.65" diâmetro de base x 3.62" altura (67mm x 92mm) |
| Cabo | 10 ft RG-58 (3 metros) |

Diagrama de Irradiação

Horizontal

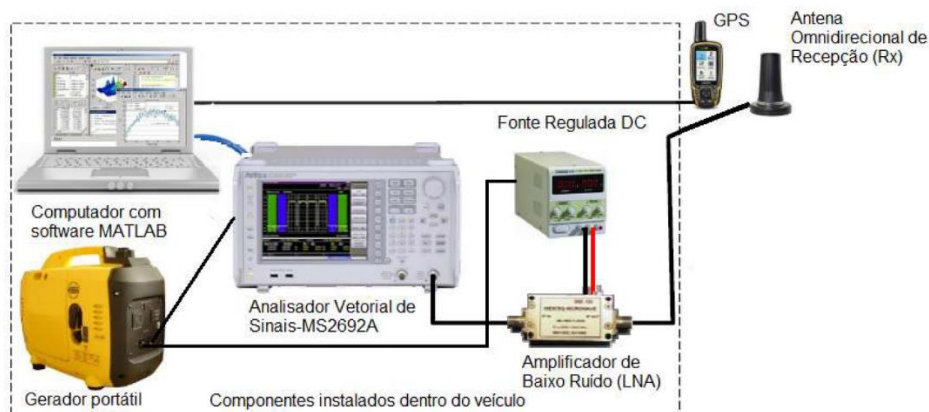
Vertical

Antena Montada na Van de Medições

Fonte: Do Autor

Para uma melhor captura do sinal propagado no ambiente em estudo a velocidade de deslocamento da unidade móvel foi de 10 km/h e seguiu uma rota dentro do perímetro da Área de Vivência 1. O setup de recepção ficou montado de acordo com o ilustrado na Figura 22.

Figura 22: Estrutura do Setup de Recepção das Medições na Área de Vivência 1



Fonte: Adaptada de [28]

6.2.2 Medição na Área de Vivência 2

O principal objetivo da segunda campanha de medidas foi a comparação da perda de potência do sinal propagado em áreas com predominância de vegetação nas faixas de 900 MHz e 2500 MHz. Como foi mencionado no Capítulo 5, a versão IEEE 802.11 ah [2] trabalha na faixa não licenciada de 900 MHz [61] [62] e, portanto, buscou-se nessas medições examinar as características banda estreita do canal nessa faixa de frequência e depois compará-las com as características na faixa de 2500 MHz.

Nesse caso, como o objetivo era caracterizar em banda estreita, utilizou-se o mesmo setup de transmissão da primeira campanha de medições, mas um alternativo setup de recepção que utilizava apenas um analisador de espectro e um computador portátil montados sobre uma mesa com rodas, um “carrinho” azul, que permitiu o deslocamento do setup de recepção dentro do perímetro da Área de Vivência 2. No setup de transmissão, para a medição em 900 MHz não foi utilizado um amplificador de potência, entretanto, utilizou-se a saída máxima de potência admissível pelo Gerador Vetorial de Sinais, para compensar a falta do amplificador. Os valores dos parâmetros utilizados, perdas nos cabos e outras informações para as medições em 900 MHz e 2500 MHz são apresentados nas

duas tabelas da Figura 23. A Figura 24 mostra a estrutura do setup de recepção da segunda campanha de medições.

Figura 23: Tabelas de parâmetros dos setups de transmissão para 900 MHz e 2500 MHz

| 900 MHz | | 2500 MHz | |
|---------------------------------|----------|---------------------------------|----------|
| Transmitter | | Transmitter | |
| Saída do Gerador de Sinais | 13 dBm | Saída do Gerador de Sinais | -30 dBm |
| Frequency | 910 MHz | Frequency | 2500 MHz |
| Antenna Gain | 3 dBi | Power Amplifier Gain | 46 dB |
| Loss Cables and Conectors | 3,3 dB | Antenna Gain | 3 dBi |
| Antenna height above the ground | 5 m | Loss Cables and Conectors | 4,6 dB |
| EIRP | 12,7 dBm | Antenna height above the ground | 5 m |
| Receiver | | Receiver | |
| Omni directional Antenna Gain | 3 dB | Omni directional Antenna Gain | 5 dB |
| Loss Cables and Conectors | 1,8 dB | Loss Cables and Conectors | 3,3 dB |
| Antenna height above the ground | 1,5 m | Antenna height above the ground | 1,5 m |

Fonte: Do Autor

Figura 24: Estrutura do Setup de Recepção das Medições na Área de Vivência 2



Fonte: Do Autor.

7 ANÁLISE DOS DADOS E RESULTADOS

Devido à natureza do canal ser aleatória, sua modelagem matemática deve ser feita com auxílio de estatísticas e, com as diversas distribuições de probabilidade que são trabalhadas a fim de se prever o comportamento do sinal. A modelagem estatística tem como

objetivo estimar o desempenho de um canal rádio, buscando o ajuste nos padrões através de funções de distribuição de probabilidades no meio de propagação do um sinal. A função densidade probabilidade (PDF – *Probability Density Function*) é a derivada da função de distribuição de probabilidades, sendo assim, amplamente utilizada na modelagem estatística.

Os resultados obtidos pelas medições realizadas em campo nas frequências estudadas, receberam essas análises estatísticas e suas funções de densidade de probabilidade (PDF) e funções de distribuição cumulativa (CDF) foram determinadas e comparadas com as funções de distribuição teóricas tradicionais, tais como, Lognormal, Rayleigh, Rice, Nakagami e Weibull. Essas principais distribuições de probabilidade são apresentadas na Tabela 5.

A elaboração das funções densidade probabilidade dos dados empíricos foi realizada em *software* MATLAB e seguiu o seguinte procedimento:

- a. A partir dos dados observados, monta-se um histograma com o quantitativo de um determinado range de valores medidos. Depois divide-se esse range com valores que são observados em X intervalos disjuntos pelo número total de observações e, desta forma encontra-se o percentual de ocorrência daquele range de valores, encontrando a curva de densidade de probabilidade;
- b. São traçados gráficos de comparação empírica com curva das funções de densidade probabilidade teóricas.
- c. Estimaram-se os parâmetros das distribuições de probabilidades a partir de estimadores de máxima verossimilhança (MLE, do inglês *Maximum- Likelihood Estimation*), através do comando “MLE” do programa MATLAB que realiza essa estimação com intervalo de confiança de 95%.
- d. Por fim, os ajustes das distribuições de probabilidade teóricas com a distribuição de dados empíricos são realizados a partir de testes de hipóteses Qui-quadrado e Komolgorov-Smirnov.

Tabela 5: Descrição das principais distribuições de probabilidade

| DISTRIBUIÇÃO | DESCRIÇÃO |
|--------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| LOG NORMAL | Usada para descrever uma variação do sinal em larga escala, envolvendo grandes distancias, devido aos múltiplos percursos em ambientes com obstáculos. Sua função densidade Probabilidade: $f(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln(x) - \mu)^2}{2\sigma^2}\right]$ sendo μ , σ e x : média, desvio padrão e variável aleatória representando o valor normalizado da voltagem |
| NAKAGAMI | Baseada em estudos experimentais sobre desvanecimento rápido em propagação na faixa de HF. Tal distribuição torna-se de Rayleigh quando $m=1$. Função Densidade Probabilidade: $f(x; m, \Omega) = 2 \left(\frac{m}{\Omega}\right)^m \frac{1}{\Gamma(m)} x^{(2m-1)} \exp\left[-\frac{m}{\Omega} x^2\right] ; m = \frac{\Omega^2}{E[(x^2 - \Omega)^2]}$ Sendo, respectivamente, m e Ω : fator de desvanecimento e potência média temporal do sinal recebido |
| WEIBULL | Originalmente empregada na predição de falhas, é largamente aplicada em diversas áreas se demonstrando útil na sua descrição de canais com desvanecimento através do multipercurso. Tal descrição tende a ser de Rayleigh quando $\alpha=2$ $f(x; \lambda, \alpha) = \frac{\alpha}{\lambda} \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{\alpha-1} \exp\left(-\frac{x}{\lambda}\right)^\alpha$ Sendo α , x : parâmetro de forma, parâmetro de escala e variável aleatória. |
| RAYLEIGH | Se ajusta em ambiente homogêneos e com elevado número de ondas originadas de Multipercursos e sem linha de visada. A função densidade probabilidade dessa função é em função de um parâmetro de desvanecimento e geralmente apresenta bons resultados em dados experimentais. $f(x; \sigma) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right)$ Onde $2\sigma^2$ é a potência média no tempo. |
| RICE | Se aplica quando há visada direta ou componente especular refletida que contribui de modo significativo para o sinal recebido. $f(x; s, \sigma) = I_0\left(\frac{xs}{\sigma^2}\right) \frac{x}{\sigma^2} \exp\left[-\frac{x^2 + s^2}{2\sigma^2}\right]$ |

Fonte: Do Autor.

Além disso, os resultados encontrados em campo de perda de percurso com a distância foram comparados com os resultados obtidos por modelos de propagação empíricos tradicionais adequados à faixa de frequência utilizadas no trabalho em questão. Neste caso, o título de comparação analítica utilizou-se de cálculos de Erro Médio, Desvio Padrão do Erro e Erro RMS entre os resultados medidos e aqueles fornecidos pelos modelos de propagação.

7.1 Caracterização Banda Estreita

Os dados coletados durante as campanhas de medição foram armazenados em disco rígido na forma de arquivos .XML e .DGZ, que são os formatos fornecidos pelo Analisador Vetorial MS 2692 A da ANRITSU. A partir desses dados brutos e das coordenadas geográficas adquiridas pelo GPS GARMIM, foi então realizado o pós-processamento em MATLAB. Foi executada apenas uma medição em 900 MHz, mas foram feitas duas medições em 2500 MHz. As duas medições em 2500 MHz foram utilizadas em uma só análise neste trabalho, por essa razão é notável nos gráficos apresentados mais a seguir, que existe um número maior de medições em 2500 MHz do que em 900 MHz.

Os dados foram organizados e tabelados juntamente com sua respectiva coordenada geográfica (latitude e longitude), a distância entre transmissor e receptor (em metros) e a potência média do sinal recebido em dBm. Uma representação dos dados tabelados é mostrada abaixo.

Tabela 6: Representação das tabelas de dados capturados

| Modelo da Tabela de Dados Resultante do Pós Processamento dos Dados Capturados nas Rotas de Medição | | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|----------|------------------|----------------|--------------------------------------------|
| Índice da Amostra | Longitude | Latitude | Dist. do Tx - Rx | Potência (dBm) | Sequencia de 2176 amostras IQ |
| 11 | -43,232 | -22,978 | 49,408 | -12,934 | 0,12512 + i0,00041 ... -0,00745 - i0,0112 |
| 12 | -43,232 | -22,978 | 49,47 | -13,907 | 0,0262 + i0,07521 ... 0,12512 + i0,00041 |
| 13 | -43,232 | -22,978 | 49,501 | -10,76963 | 0,12355 + i0,01769 ... 0,06853 + i0,0634 |
| 14 | -43,232 | -22,978 | 49,532 | -11,376 | -0,067391 + i0,00080 ... -0,1117 + i0,0498 |
| 15 | -43,232 | -22,978 | 49,573 | -8,81935 | 0,26212 + i0,00964 ... 0,0790 + i0,1085 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| 814 | -43,232 | -22,978 | 49,573 | -8,81935 | 0,26212 + i0,00964 ... 0,0790 + i0,1085 |

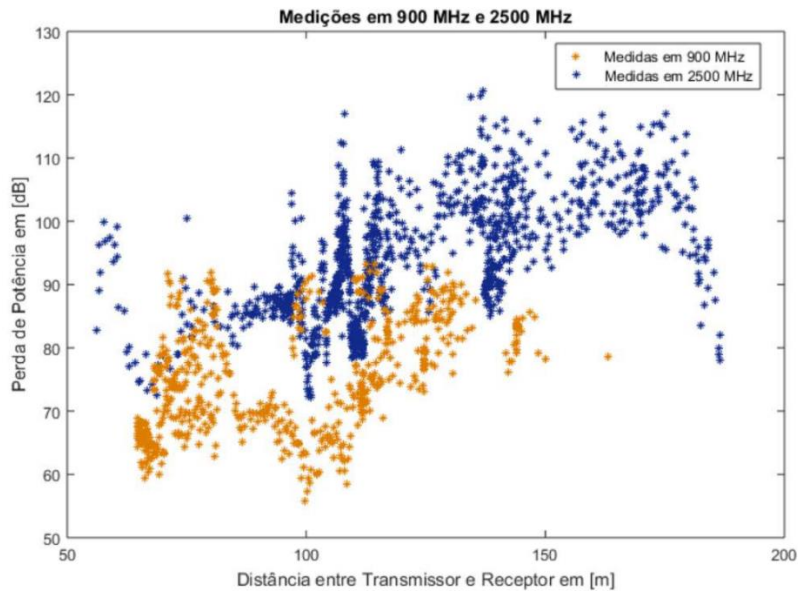
Fonte: Do Autor.

De posse dos valores de potência do sinal recebido e das distâncias entre transmissor e receptor, foi possível analisar trechos pequenos de variabilidade do sinal e separar os três tipos de efeitos do canal banda estreita para as medições de 900 MHz e 2500 MHz.

Para a análise de perda de percurso, análise estatística de larga escala e comparação das perdas reais medidas com as estimadas pelos modelos de propagação, foram levados em consideração todos os pontos das rotas, enquanto que para análise de pequena escala, as rotas foram divididas em pequenos trechos de forma a separar onde o sinal era predominantemente com visada ou sem visada.

O gráfico da Figura 25 mostra as perdas encontradas empiricamente nas frequências de 900 MHz e 2500 MHz em função da distância entre transmissor e receptor nos ambientes de medição descritos anteriormente.

Figura 25: Comparação das perdas de propagação medidas em 900 MHz e 2500 MHz.



Fonte: Do Autor.

7.1.1 Análise da Perda de Percurso

O expoente de perda de percurso com a distância foi calculado separadamente para as faixas de frequência de 900 MHz e 2500 MHz e os resultados estão sumarizados na Tabela 7.

O procedimento adotado para a determinação do expoente de perda de percurso n a partir das medidas obtidas em campo, foi desenvolvido por [69] a partir da conclusão de que a perda de percurso global pode ser descrita por uma equação linear, quando a distância é tomada em escala logarítmica, representada por:

$$y = a + Kx \quad (7.1)$$

onde y representa a perda média de percurso; a representa a perda de percurso numa distância de referência d_0 próxima do transmissor, $K = 10n$, representa a inclinação da reta, sendo n o expoente de perda de percurso procurado e $x_i = \log(d_i)$ é o logaritmo da distância em cada i -ésimo ponto onde o sinal foi medido.

A partir dos valores de y e x conhecidos de cada ponto das medições realizadas em campo, não haverá um único valor de a e de K que satisfaçam todas as equações geradas a partir de (7.1), portanto o procedimento descrito por [69] permite a obtenção dos valores de a e de K que fornecem a equação da reta de perda de potência com a distância que

melhor se ajusta aos dados medidos. As equações geradas a partir de (7.1) são escritas de forma matricial, conforme mostrado na expressão (7.2):

$$X^T X = X^T y \quad (7.2)$$

onde X é uma matriz de ordem $(ix2)$ e X^T sua transposta. A solução da expressão (7.2) é a solução aproximada por mínimos quadrados de $X \cdot c = y$, onde:

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_1 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & x_i \end{bmatrix} \quad y = \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_2 \end{bmatrix} \quad c = \begin{bmatrix} a \\ K \end{bmatrix}$$

Os resultados obtidos com os valores das medições experimentais para propagação do sinal em 900 e 2500 MHz na Tabela 7 e nas figuras 26 e 27.

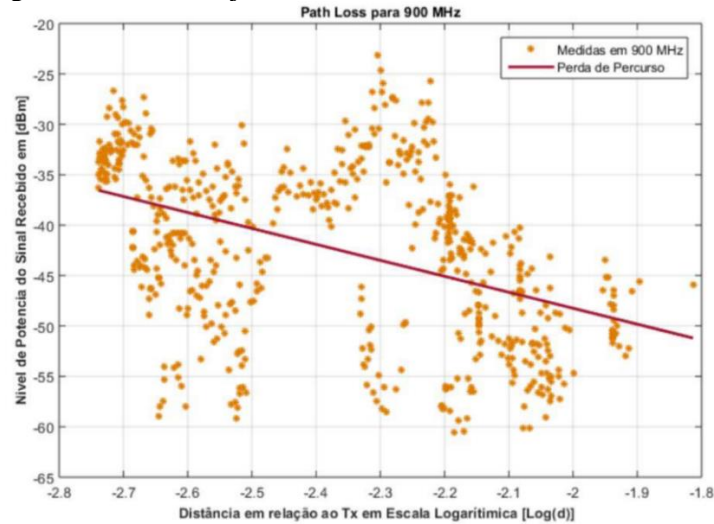
Tabela 7: Expoente de perda de percurso da Potência com a Distância

| Frequencia | n |
|------------|------|
| 900 MHz | 1,68 |
| 2500 MHz | 2,57 |

Fonte: Do Autor.

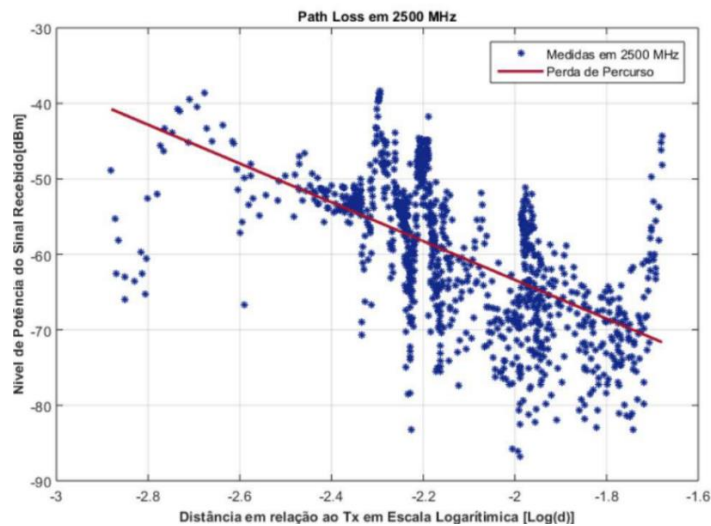
Na Tabela 7, especificamente, verifica-se que o índice de perda de percurso (n) na faixa de 900 MHz foi um valor abaixo da perda característica para espaço livre. Esse resultado leva ao entendimento de que houve componentes de Multipercursos oriundos de reflexão e espalhamento no ambiente, com contribuições aditivas no sinal recebido. Outro fator é que a maior distância entre o transmissor e o receptor é de apenas 160 metros para o caso das medições em 900 MHz e as perdas nessa faixa nessa distância foram muito pequenas.

Figura 26: Reta de Ajuste de Perda com a Distância – 900 MHz



Fonte: Do Autor

Figura 27: Reta de Ajuste de Perda com a Distância – 2500 MHz



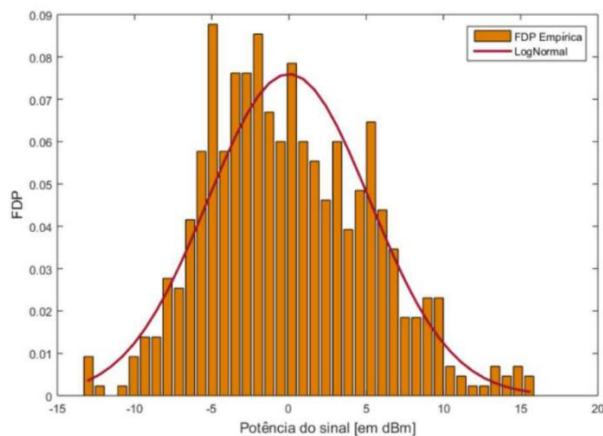
Fonte: Do Autor

7.1.2 Variabilidade em Larga Escala

Conforme mencionado no capítulo 2, o sombreamento do sinal que se propaga no canal rádio móvel gera uma variabilidade em larga escala que, em geral, assume um comportamento estatístico que tende a uma distribuição Lognormal. Diversos experimentos já comprovaram esta condição. No caso das medições realizadas nos dois ambientes com predominância de vegetação mencionados neste trabalho, as distâncias percorridas foram muito pequenas e a topografia e morfologia do terreno não foi significativamente acidentada, entretanto, houveram posições do receptor em relação ao transmissor que podem ser

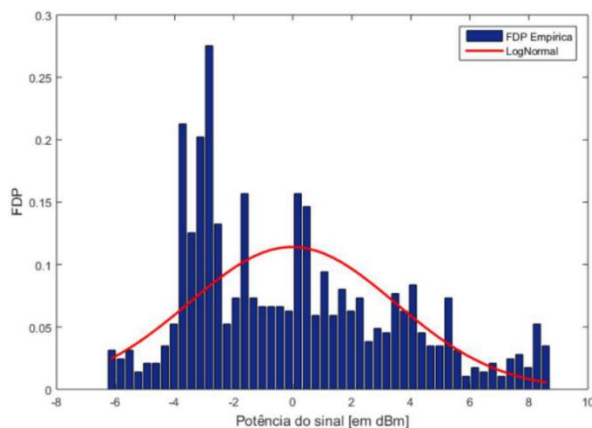
caracterizados como ambientes de sombreamento, dada a intensidade da parede de vegetação entre o transmissor e o receptor. Assim, decidiu-se calcular as curvas de densidade de probabilidades da intensidade do sinal recebido nas duas faixas de frequência e compará-las com uma curva de densidade de probabilidade Lognormal. O resultado encontrado se mostrou nas Figuras 28 e 29.

Figura 28: Distribuição de Probabilidade do Desvanecimento em Larga Escala para 900 MHz



Fonte: Do Autor.

Figura 29: Distribuição de Probabilidade do Desvanecimento em Larga Escala para 2500 MHz



Fonte: Do Autor.

Nota-se que os resultados apresentaram relativa aderência com a distribuição Lognormal. Para essa validação, foi aplicado o teste do qui-quadrado. As distribuições empíricas de cada região estudada, passaram no teste qui-quadrado quando comparadas com a distribuição de probabilidade teórica Lognormal.

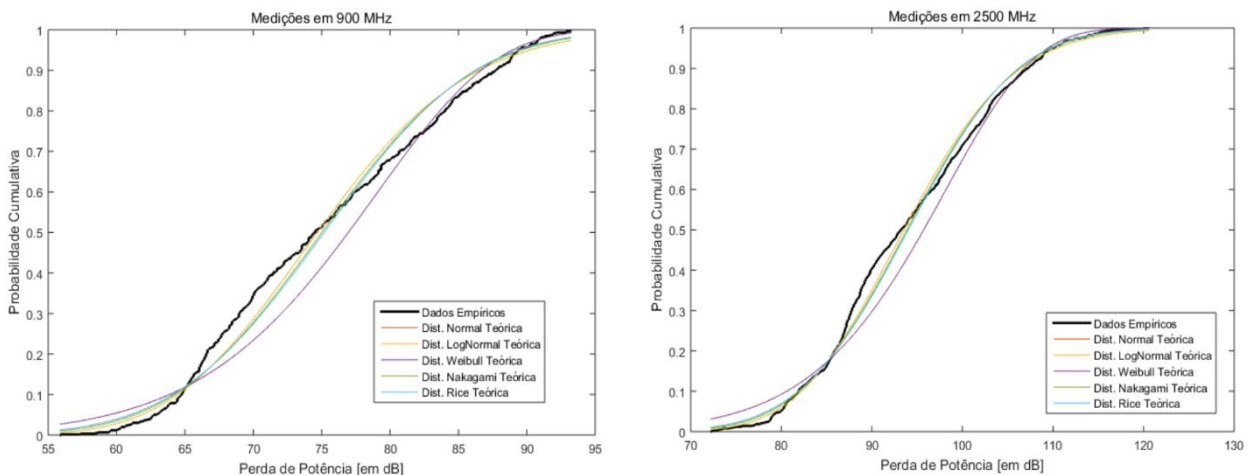
7.1.3 Análise da Perda de Propagação e Comparação com Modelos

A perda de propagação foi calculada em cada ponto onde houve uma medição. Os dados de potência recebida e distância gravados no momento das medições foram utilizadas para calcular a perda real no canal e os valores de predição dos modelos de propagação discutidos no Capítulo 3.

As estatísticas dos valores de perda de propagação para as faixas de 900 MHz e 2500 MHz estão mostradas nos gráficos de distribuição cumulativa da Figura 30.

A Tabela 8 sumariza os valores de desvio e erro médio quadrático entre as curvas de distribuição de probabilidade cumulativa teórica e empírica para análise de melhor aderência. Também foi aplicado o teste de Kolmogorov-Smirnov para verificação das estatísticas de melhor aderência com os resultados empíricos. Os parâmetros das distribuições gerados por estimação de máxima verossimilhança também estão apresentados na Tabela 8.

Figura 30: Distribuição de Probabilidade do Cumulativa das Perdas de Potência na faixa de 900 MHz e de 2500 MHz



Fonte: Do Autor.

Tabela 8: Valores dos parâmetros das distribuições de probabilidade da perda de propagação para cada faixa de frequência estudada

| Frequência | Distribuição | Desvio entre as curvas práticas e teóricas de PDF (%) | Erro médio Quadrático entre os valores observados e esperados | Distribuições que passaram no teste do Komolgorov-Smirnov | Parâmetros estimados por MLE a partir dos dados empíricos | |
|------------|--------------|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|--------|
| 900 MHz | Lognormal | 0,0274 | 0,011 | X | (σ) | 4,313 |
| | | | | | | 0,114 |
| | Weibull | 0,0386 | 0,021 | | (λ) | 9,495 |
| | | | | | (α) | 79,081 |
| | Nakagami | 0,0289 | 0,012 | | (m) | 19,205 |
| | | | | | (Ω) | 5,725 |
| Rice | 0,0302 | 0,013 | | (s) | 74,671 | |
| | | | | (σ) | 8,658 | |
| 2500 MHz | Lognormal | 0,0153 | 0,0633 | | (σ) | 4,538 |
| | | | | | | 0,1008 |
| | Weibull | 0,293 | 0,151 | | (λ) | 10,477 |
| | | | | | (α) | 98,373 |
| | Nakagami | 0,0158 | 0,0512 | X | (m) | 24,829 |
| | | | | | (Ω) | 8,929 |
| Rice | 0,0166 | 0,0583 | X | (s) | 93,534 | |
| | | | | (σ) | 9,508 | |

Fonte: Do Autor.

Para a faixa de 900 MHz apenas a distribuição Lognormal passou no teste de hipóteses e para a faixa de 2500 MHz as distribuições de Nakagami e Rice. Esperava-se encontrar um mesmo tipo de distribuição para as perdas de potências nas duas faixas, mas não aconteceu.

Para as medidas de perda de potência média do sinal recebido, foram realizadas análises separadas para as duas faixas de frequência, assim como a comparação com os principais modelos empíricos e semi-empíricos utilizados para ambientes urbanizados e com predominância de vegetação, todos apresentados no capítulo 3.

Uma análise quantitativa foi realizada para identificar a melhor aderência e comparação de cada modelo de propagação discutido. Essa análise foi realizada através do cálculo dos valores de Erro Médio (δ), Desvio Padrão do Erro (σ) e de Erro RMS, entre os resultados medidos e fornecidos por cada modelo de propagação.

O valor do Erro Médio foi determinado por:

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^k Y(i) - X(i)}{k} \quad (7.3)$$

Sendo que X(i) representa o valor medido na posição i, Y(i) representa o valor do modelo na posição i e k representa o número de medições realizadas em cada rota.

O Desvio Padrão do Erro foi determinado por:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k [E(i) - \delta]^2}{k - 1}} \quad (7.4)$$

Onde $E(i)$ é a diferença entre o resultado medido e o do modelo na posição i .

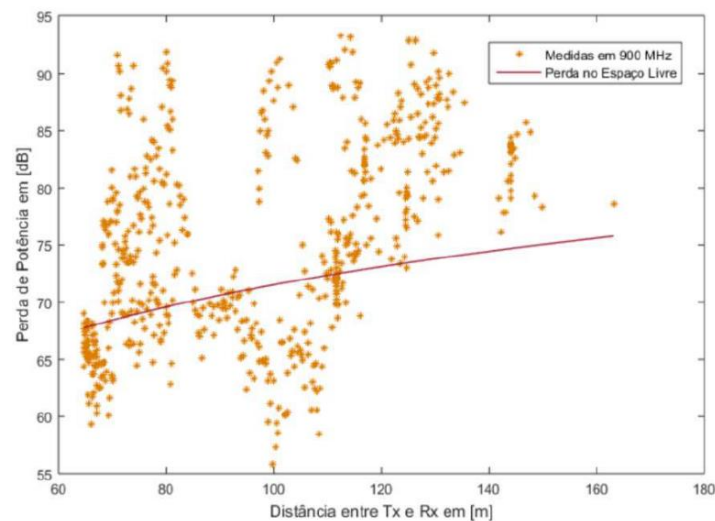
O Erro RMS que representa conjuntamente o Erro Médio e o Desvio Padrão do Erro, foi determinado por:

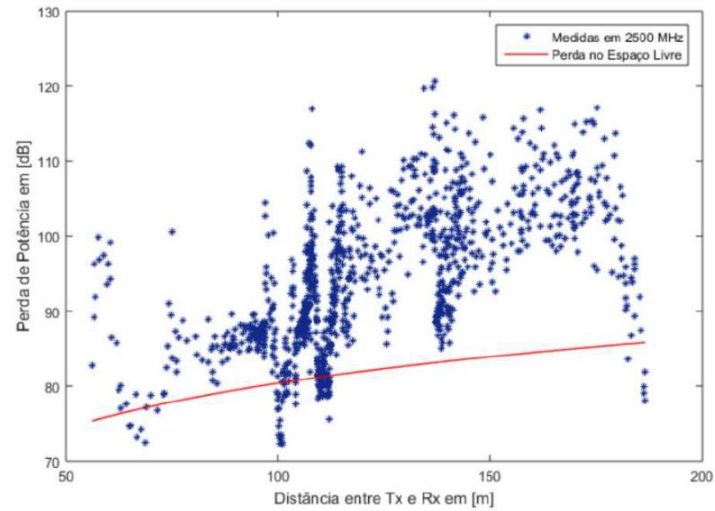
$$E_{RMS} = \sqrt{\delta^2 + \sigma^2} \quad (7.5)$$

Abaixo de cada gráfico comparativo das Figuras 31 a 32, está informado os valores de Erro Médio, Desvio Padrão e Erro RMS encontrados.

a) Comparação com a Perda no Espaço Livre

Figura 31: Comparação das Medidas de Perda de Potência em 900 MHz e de 2500 MHz com o Modelo de Perda no Espaço Livre





Fonte: Do Autor.

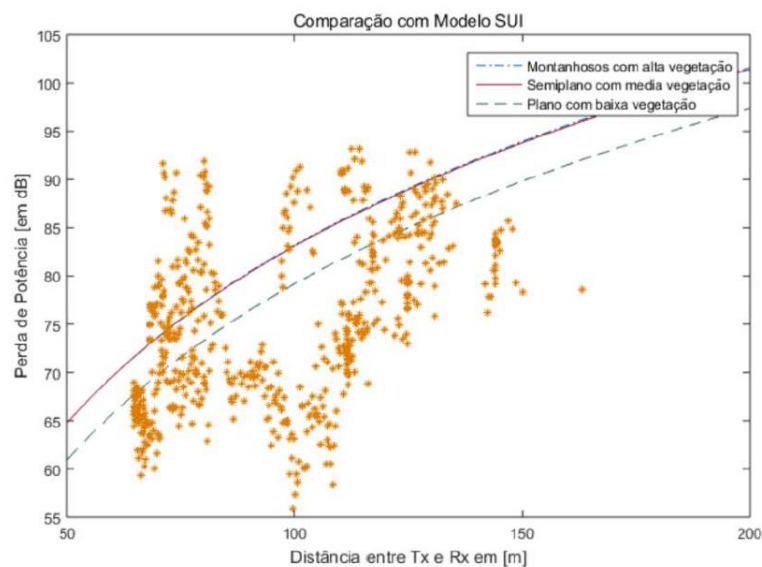
Tabela 9: Tabela de erros calculados entre os valores medidos e o modelo de propagação no espaço livre.

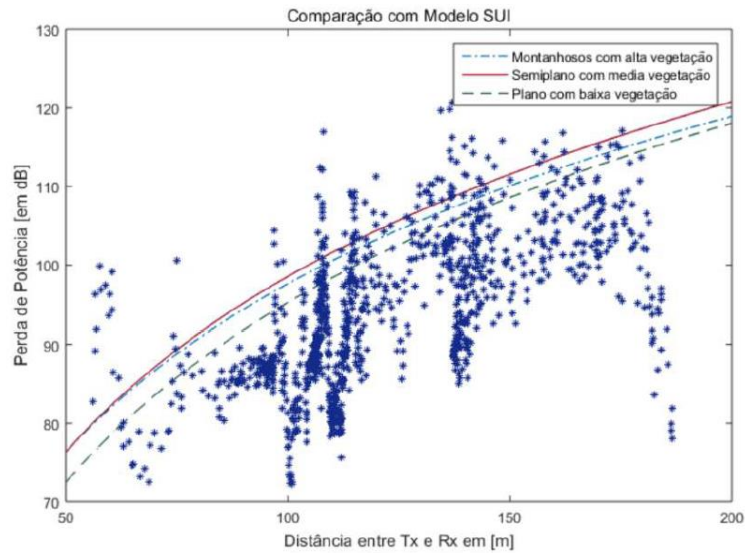
| Comparativo com o Modelo de Perda no Espaço Livre | | |
|------------------------------------------------------|---------|----------|
| Frequências | 900 MHz | 2500 MHz |
| Erro Médio | 8,10 | 13,42 |
| Desvio Padrão | 5,53 | 7,93 |
| Erro RMS | 9,12 | 14,74 |

Fonte: Do Autor.

b) Comparação com Modelo de Propagação SUI

Figura 32: Comparação das Medidas de Perda de Potência em 900 MHz (laranja) e de 2500 MHz (azul) com o Modelo SUI





Fonte: Do Autor.

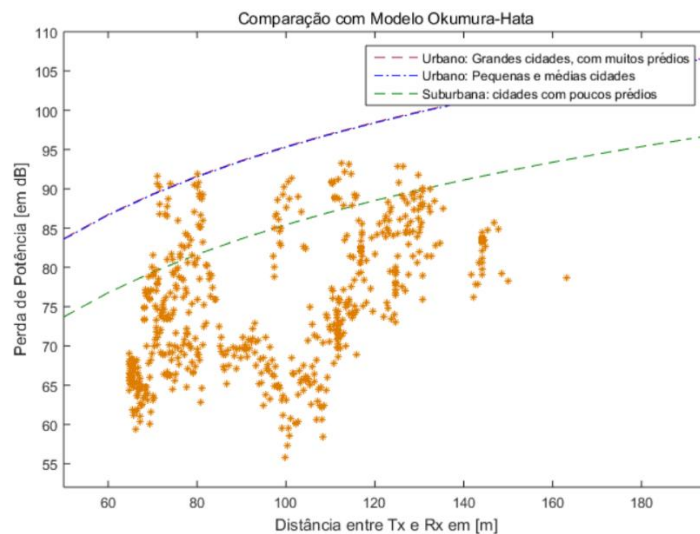
Tabela 10: Tabela de erros calculados entre os valores que foram medidos e o modelo de propagação SUI

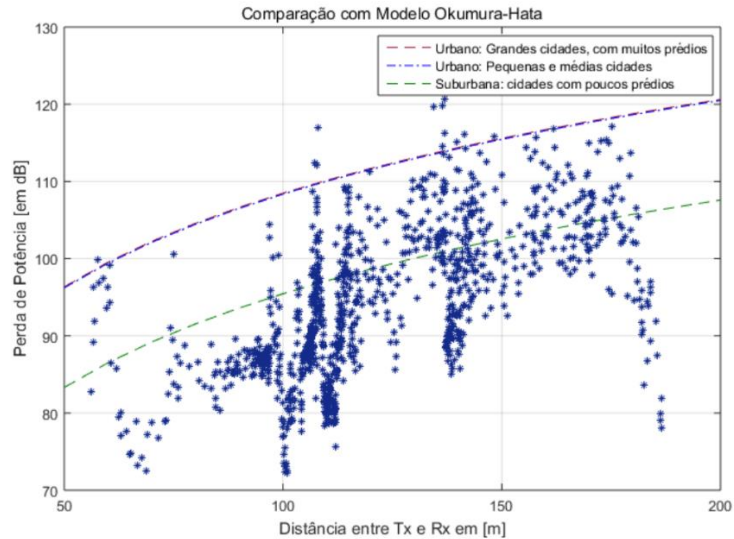
| Frequências | Comparativo com Modelo de Propagação SUI | | | | | |
|---------------|------------------------------------------|-----------|-------|------------|-----------|-------|
| | 900 MHz | | | 2500 MHz | | |
| | Montanhoso | Semiplano | Plano | Montanhoso | Semiplano | Plano |
| Erro Médio | 17,04 | 16,93 | 13,38 | 18,13 | 19,21 | 16,8 |
| Desvio Padrão | 8,55 | 8,52 | 7,91 | 7,65 | 8,11 | 7,96 |
| Erro RMS | 19,07 | 18,96 | 15,54 | 19,68 | 20,85 | 18,59 |

Fonte: Do Autor.

c) Comparação com Modelo de Propagação Okumura-Hata

Figura 33: Comparação das Medidas de Perda de Potência em 900 MHz (laranja) e de 2500 MHz (azul) com o Modelo Okumura-Hata





Fonte: Do Autor.

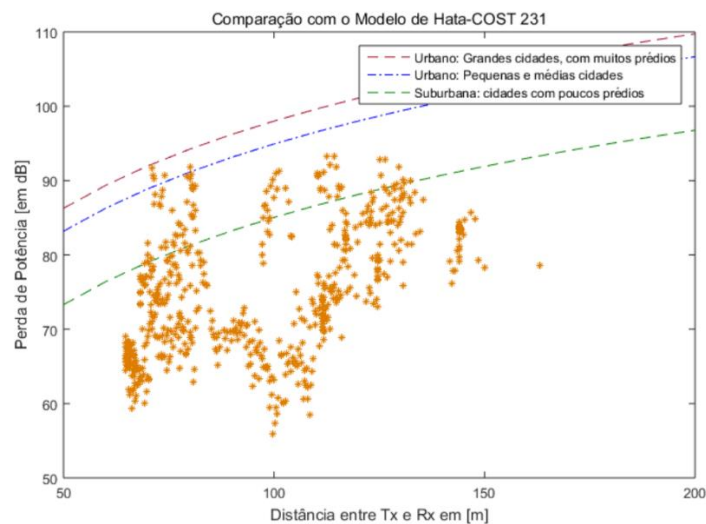
Tabela 11: Tabela de erros calculados entre os valores medidos e o modelo de propagação Okumura-Hata

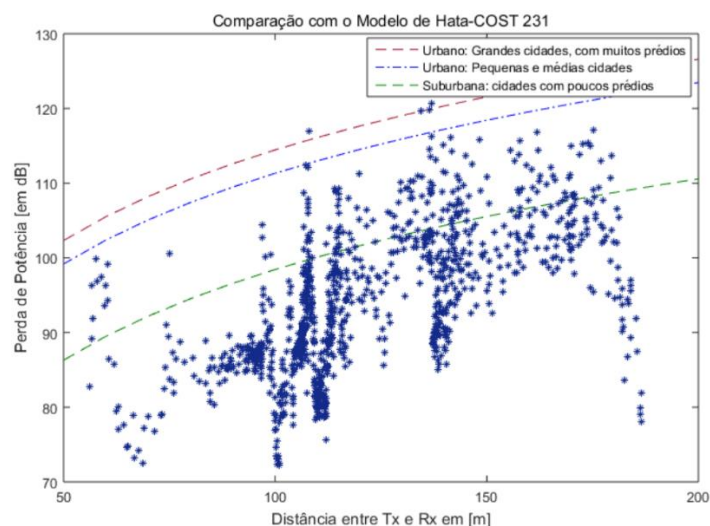
| Comparativo com Modelo de Propagação Okumura-Hata | | | | | | |
|---------------------------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|-----------|-------------------------|-----------------------------------|-----------|
| Frequências | 900 MHz | | | 2500 MHz | | |
| | Urbano: Grandes cidades | Urbano: Pequenas e médias cidades | Suburbano | Urbano: Grandes cidades | Urbano: Pequenas e médias cidades | Suburbano |
| Erro Médio | 30,37 | 30,29 | 21,03 | 19,76 | 19,64 | 9,8 |
| Desvio Padrão | 6,85 | 6,85 | 6,7 | 12,24 | 12,24 | 7,2 |
| Erro RMS | 31,13 | 31,06 | 22,07 | 23,24 | 23,14 | 11,14 |

Fonte: Do Autor.

d) Comparação com Modelo de Propagação COST 231

Figura 34: Comparação das Medidas de Perda de Potência em 900 MHz (laranja) e de 2500 MHz (azul) com o Modelo COST 231





Fonte: Do Autor.

Tabela 12: Tabela de erros calculados entre os valores medidos e o modelo de propagação COST 231

| Comparativo com Modelo de Propagação COST 231 | | | | | | |
|-----------------------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|-----------|-------------------------|-----------------------------------|-----------|
| Frequências | 900 MHz | | | 2500 MHz | | |
| | Urbano: Grandes cidades | Urbano: Pequenas e médias cidades | Suburbano | Urbano: Grandes cidades | Urbano: Pequenas e médias cidades | Suburbano |
| Erro Médio | 32,82 | 29,93 | 20,67 | 25,36 | 22,43 | 11,27 |
| Desvio Padrão | 6,90 | 6,85 | 6,69 | 12,29 | 12,26 | 11,22 |
| Erro RMS | 33,54 | 30,71 | 21,72 | 28,18 | 25,56 | 15,91 |

Fonte: Do Autor.

Como um dos principais objetivos deste trabalho é analisar a influência da vegetação na propagação de sinais em ambientes que se assemelhem a parques e praças públicas, e não de analisar necessariamente as Áreas de Vivência 1 e 2 especificamente, tomou-se a decisão de juntar as medidas realizadas em 2500 MHz realizadas nas duas Áreas de Vivência.

A primeira comparação de perda de potência do sinal nas Áreas de Vivência 1 e 2, foi a comparação com a perda no espaço livre. As perdas em 900 MHz e 2500 MHz e a predição de perda no espaço livre estão mostradas na Figura 31. Nota-se que, em muitos pontos onde o sinal foi capturado, a perda de potência no receptor foi abaixo da perda no espaço livre. As medições foram realizadas em vários pontos com visada e outros sem visada e essa distinção não pôde ser realizada durante as medições. Entende-se que os maiores valores de perda ocorreram nos locais exatamente onde não havia visada com o transmissor e que os pontos que apresentaram valores de perda de potência abaixo da perda no espaço livre, ocorreram em locais onde havia visada com o transmissor e que

tiveram componentes aditivas de multipercursos fazendo com que o sinal tivesse uma potência maior no receptor. A Tabela 9 apresenta os valores de erros médio e erro RMS entre os valores de perda medidos e os preditos pelo modelo no espaço livre.

Após a comparação com a perda no espaço livre, comparamos as perdas reais no canal com os modelos de predição de áreas urbanas mais consagrados e utilizados.

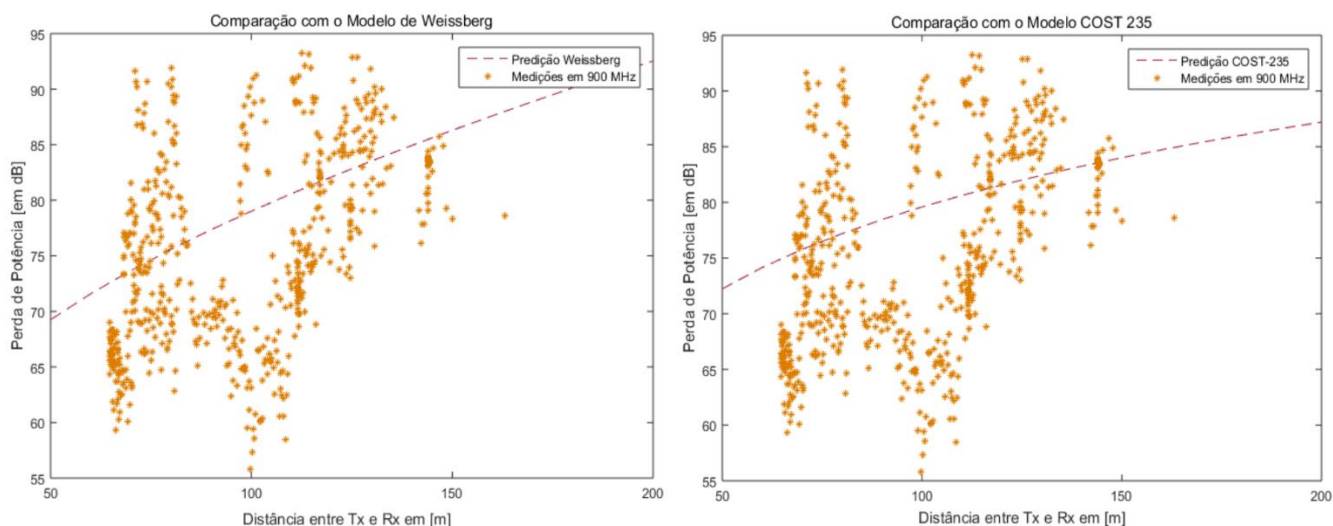
Observamos que para faixa de 900 MHz, os modelos SUI, Okumura-Hata e COST-231, não apresentaram boa concordância e os erros médio e RMS foram muito elevados. Entretanto para as medições em 2500 MHz a concordância dos valores medidos e preditos pelos modelos obteve melhorias e os erros foram menores. O modelo de Okumura-Hata para regiões suburbanas foi o que melhor se adequou com os dados empíricos, apresentando os menores valores de erro médio e erro RMS, de 9,80 e 11,14 respectivamente. As comparações com os modelos específicos para ambientes com vegetação estão apresentadas a seguir. Os resultados dos erros médio e RMS estão apresentados na Tabela 13. Todos os modelos específicos para ambientes com vegetação apresentaram boa concordância com os dados medidos, tanto em 900 MHz como em 2500 MHz. Mas os melhores resultados foram para a faixa de 900 MHz. O modelo Fitted ITU-R, foi dentre todos, aquele que apresentou os menores valores de erro médio e erro RMS para faixa de 900 MHz.

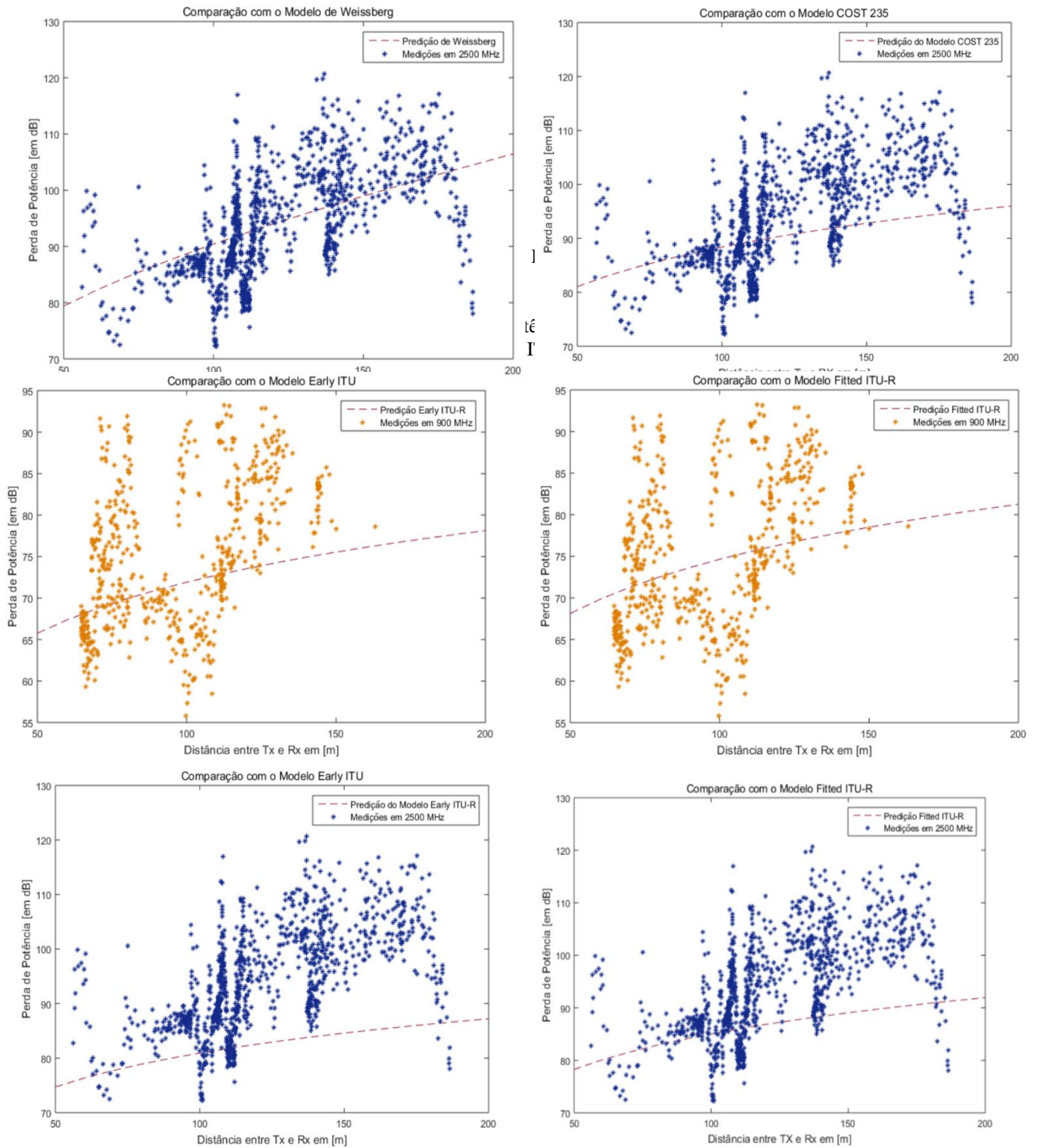
e) Comparação com Modelo de Propagação para Ambientes com Vegetação

A Figuras 35 apresenta comparação das medições de 900 MHz e 2500 MHz com a predição dos modelos de Weissberg e COST 235.

A Figura 36 apresenta a comparação das medições de 900 MHz e 2500 MHz com a predição dos modelos de Early ITU-R e Fitted ITU-R.

Figura 35: Comparação das Medidas de Perda de Potência em 900 MHz (laranja) e em 2500 MHz (azul) com os Modelos Weissberg e COST 235





Fonte: Do Autor

Tabela 13: Tabela de erros calculados entre os valores medidos e os valores preditos pelos quatro modelos de propagação para ambientes com vegetação

| Comparativo com Modelos de Propagação para Ambientes com Vegetação | | | | | |
|--------------------------------------------------------------------|----------|-----------|----------|-----------|------------|
| Frequência | 900 MHz | | | | |
| | Tipo | Weissberg | COST 235 | Early ITU | Fitted ITU |
| Erro Médio | | 14,21 | 13,06 | 7,35 | 6,2 |
| Desvio Padrão | | 7,79 | 6,01 | 4,19 | 4,53 |
| Erro RMS | | 16,21 | 14,38 | 8,46 | 8,26 |
| Frequência | 2500 MHz | | | | |
| | Tipo | Weissberg | COST 235 | Early ITU | Fitted ITU |
| Erro Médio | | 10,18 | 13,61 | 14,02 | 13,44 |
| Desvio Padrão | | 8,1 | 5,29 | 7,48 | 5,87 |
| Erro RMS | | 12,09 | 14,61 | 15,89 | 14,67 |

Fonte: Do Autor.

Tabela 14: Resumo dos valores de comparação entre os modelos e os resultados das medições

| Comparativo dos Erros entre a medição e os Modelos de Predição | | | | |
|----------------------------------------------------------------|--------------------------|---------------|--------------|------------------------|
| Erro Analisado | Modelos de Propagação | | Frequencia | |
| | | | 900 MHz | 2500 MHz |
| Erro Médio | SUI | Montanhoso | 17,04 | 18,13 |
| | | Semiplano | 16,93 | 19,21 |
| | | Plano | 13,38 | 16,8 |
| | Okumura-Hata | Urbano Denso | 30,37 | 19,76 |
| | | Urbano | 30,29 | 19,64 |
| | | Suburbano | 21,03 | 9,8 |
| | COST 231 | Urbano Denso | 32,82 | 25,36 |
| | | Urbano | 29,93 | 22,43 |
| | | Suburbano | 20,67 | 11,27 |
| | Para Ambientes Vegetados | Weissberg | 14,21 | 10,18 |
| | | Early ITU-R | 7,35 | 14,02 |
| | | Fitted ITU-R | 6,2 | 13,44 |
| | | Cost 235 | 13,06 | 13,61 |
| Desvio Padrão | SUI | Montanhoso | 8,55 | 7,65 |
| | | Semiplano | 8,52 | 8,11 |
| | | Plano | 7,91 | 7,96 |
| | Okumura-Hata | Urbano Denso | 6,85 | 12,24 |
| | | Urbano | 6,85 | 12,24 |
| | | Suburbano | 6,7 | 7,2 |
| | COST 231 | Urbano Denso | 6,9 | 12,29 |
| | | Urbano | 6,85 | 12,26 |
| | | Suburbano | 6,69 | 11,22 |
| | Para Ambientes Vegetados | Weissberg | 7,79 | 8,1 |
| | | Early ITU-R | 4,19 | 7,48 |
| | | Fitted ITU-R | 4,53 | 5,87 |
| | | Cost 235 | 6,01 | 5,29 |
| Erro RMS | SUI | Montanhoso | 19,07 | 19,68 |
| | | Semiplano | 18,96 | 20,85 |
| | | Plano | 15,54 | 18,59 |
| | Okumura-Hata | Urbano Denso | 31,13 | 23,24 |
| | | Urbano | 31,06 | 23,14 |
| | | Suburbano | 22,07 | 11,14 |
| | COST 231 | Urbano Denso | 33,54 | 28,18 |
| | | Urbano | 30,71 | 25,56 |
| | | Suburbano | 21,72 | 15,91 |
| | Para Ambientes Vegetados | Weissberg | 16,21 | 12,09 |
| | | Early ITU-R | 8,46 | 15,89 |
| | | Fitted ITU-R | 8,26 | 14,67 |
| | | Cost 235 | 14,38 | 14,61 |
| | | Erro Médio | Fitted ITU-R | Okumura-Hata suburbano |
| | | Desvio Padrão | Early ITU-R | COST 235 |
| | | Erro RMS | Fitted ITU-R | Okumura-Hata suburbano |

Fonte: Do Autor.

A Tabela 14 detalha todos os resultados de erros entre as perdas de propagação e de predição dos diversos modelos utilizados neste trabalho. Resumidamente, na faixa de 900 MHz o modelo de maior concordância com os dados medidos, foi o modelo Fitted ITU-R, seguido pelo modelo de Early ITU-R e, na faixa de 2500 MHz foi o modelo de Okumura-Hata para ambientes suburbanos, apesar dos demais modelos para ambientes com vegetação também apresentarem valores baixos de erros, como o modelo de Weissberg.

Destaca-se que, o modelo Fitted ITU-R, mesmo previsto para ser usado nas faixas de frequência de 10 a 40 GHz, demonstrou-se confiável para faixa de 900 MHz, podendo ser utilizado em predições de redes locais nos ambientes estudados neste trabalho.

O modelo Early ITU-R, utiliza as mesmas técnicas de Weissberger, sendo que suas profundidades de vegetação são inferiores a 400 metros e as frequências operam entre 200 MHz e 95 GHz, contemplando assim a faixa de 900 MHz. Tal modelo mostrou confiabilidade para predição nessa faixa em ambientes de praças e parques públicos com predominância de vegetação.

Na faixa de 2500 MHz, o modelo de Okumura-Hata, foi o mais adequado segundo os critérios de erro médio e erro RMS para regiões suburbanas. Entretanto, tais valores não foram tão diferentes dos valores apresentados pelos modelos específicos para ambientes com vegetação, como o modelo de Weissberg, que apresentou valores 10,18 e 12,09 para erros médio e RMS respectivamente, contra os valores apresentados pelo de Okumura-Hata de 9,80 e 11,14 para erros médio e RMS respectivamente.

A partir do resultado obtido e das diferenças apresentadas serem mínimas, concluiu-se que tanto o Modelo de Okumura-Hata para Regiões suburbanas, quanto os modelos para ambientes com vegetação, principalmente o de Weissberg, podem ser utilizados para predições confiáveis de propagação em 2500 MHz no tipo de ambiente estudado.

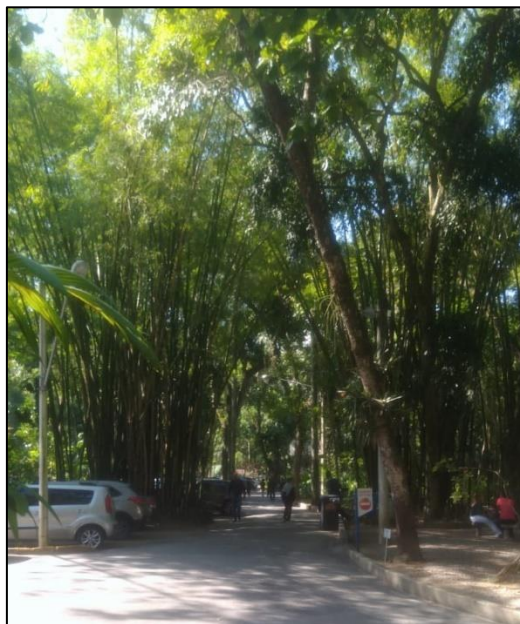
7.1.4 Variabilidade em Pequena Escala

Para a análise da variabilidade em pequena escala, foram escolhidos pequenos trechos de medição onde com certeza havia visada entre transmissor e receptor e trechos completamente sem visada. Foram escolhidos 4 trechos 2 com visada e 2 sem visada. Esses pequenos trechos tiveram seus dados separados e o estudo e análise estatística do desvanecimento em pequena escala do sinal foram realizados para cada trecho.

1) Trecho 1 com Visada – Corredor de Árvores da Área de Vivência 2

Esse foi o primeiro trecho retilíneo da rota executada na Área de Vivência 2, uma rua livre de obstrução com muita vegetação de ambos os lados. O receptor estava em visada com o transmissor.

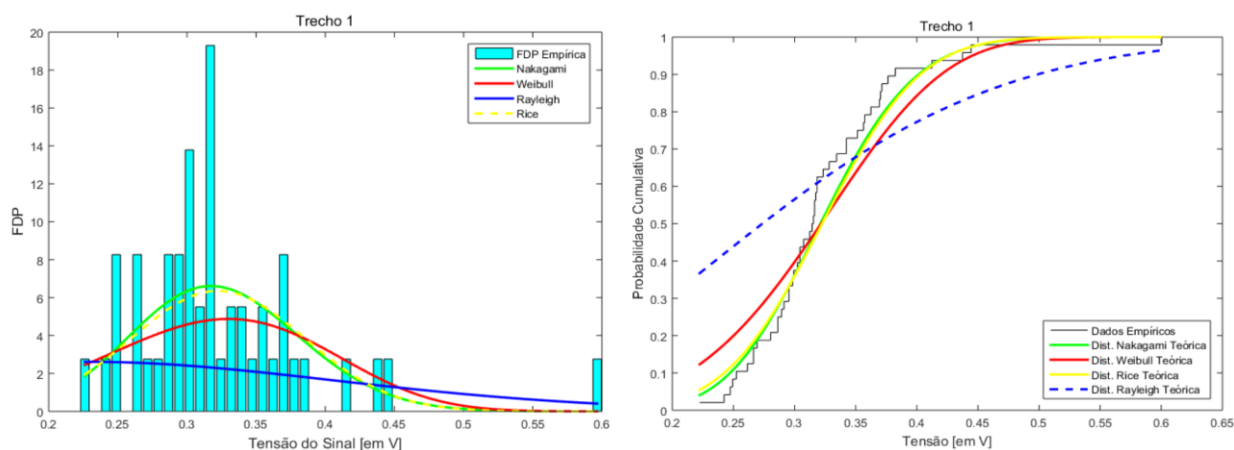
Figura 37: Trecho 1 utilizado para Análise de Variabilidade em Pequena Escala com Visada



Fonte: Do Autor.

A Figura 38 apresenta os Gráficos de PDF e CDF para as medidas realizadas nesse trecho em pequena escala e uma comparação com as FDPs e CDFs teóricas de Rayleigh, Rice, Nakagami e Weibull para medições em 900 MHz.

Figura 38: Curvas de PDF e CDF para a Análise em Pequena Escala para 900MHz – Trecho 1 (LOS)



Fonte: Do Autor.

A Tabela 15 apresenta os valores para a medição em 900 MHz dos parâmetros estimados de cada distribuição por estimadores de máxima verossimilhança; quais das curvas de distribuições de probabilidade passaram no teste do qui-quadrado e o erro médio quadrático entre os valores observados e esperados. A partir dessas informações foi possível determinar qual distribuição teórica que melhor se ajustou aos dados observados.

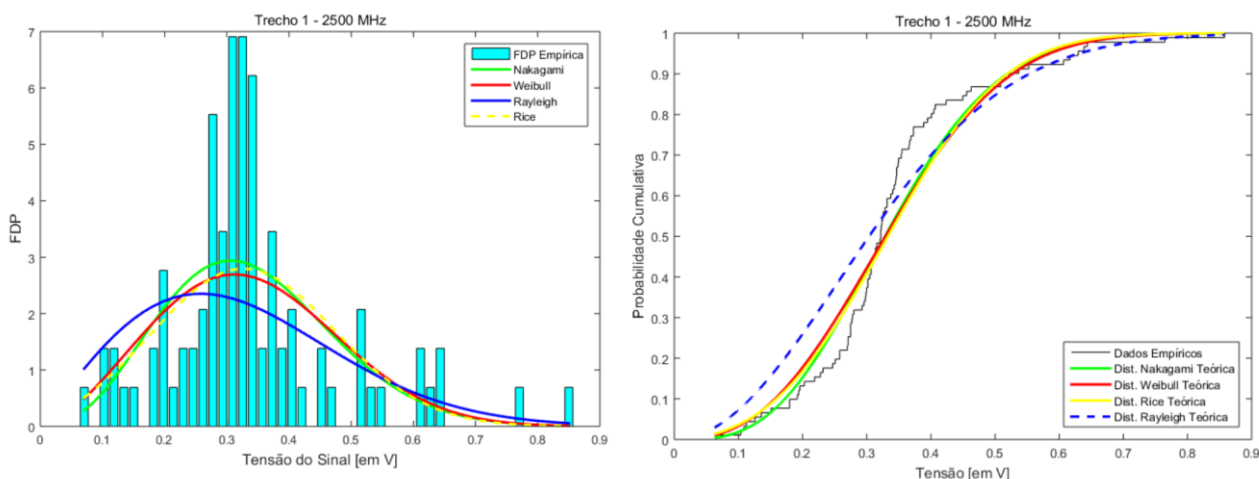
Tabela 15: Informações estatísticas de Pequena Escala para 900 MHz - Trecho 1

| Distribuições de Probabilidade | Parâmetros | Parâmetros estimados por MLE a partir dos dados empíricos | Erro médio Quadrático entre os valores observados e esperados | Distribuições que passaram no teste do Qui-Quadrado |
|--------------------------------|---------------|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Rayleigh | (σ) | 0,2324 | 8,234 | |
| Rice | (s) | 0,316 | 2,345 | X |
| | (σ) | 0,063 | | |
| Nakagami | (m) | 7,343 | 2,234 | X |
| | (Ω) | 0,1080 | | |
| Weibull | (λ) | 0,349 | 4,124 | X |
| | (α) | 4,5037 | | |

Fonte: Do Autor.

A Figura 39 apresenta os mesmos gráficos da Figura 38 para as medições em 2500 MHz para o trecho 1.

Figura 39: Curvas de PDF e CDF para a Análise em Pequena Escala para 2500MHz – Trecho 1 (LOS)



Fonte: Do Autor.

A Tabela 16 apresenta as mesmas informações da Tabela 15 para as medições em 2500 MHz para o trecho 1.

Tabela 16: Informações estatísticas de Pequena Escala para 2500 MHz - Trecho 1

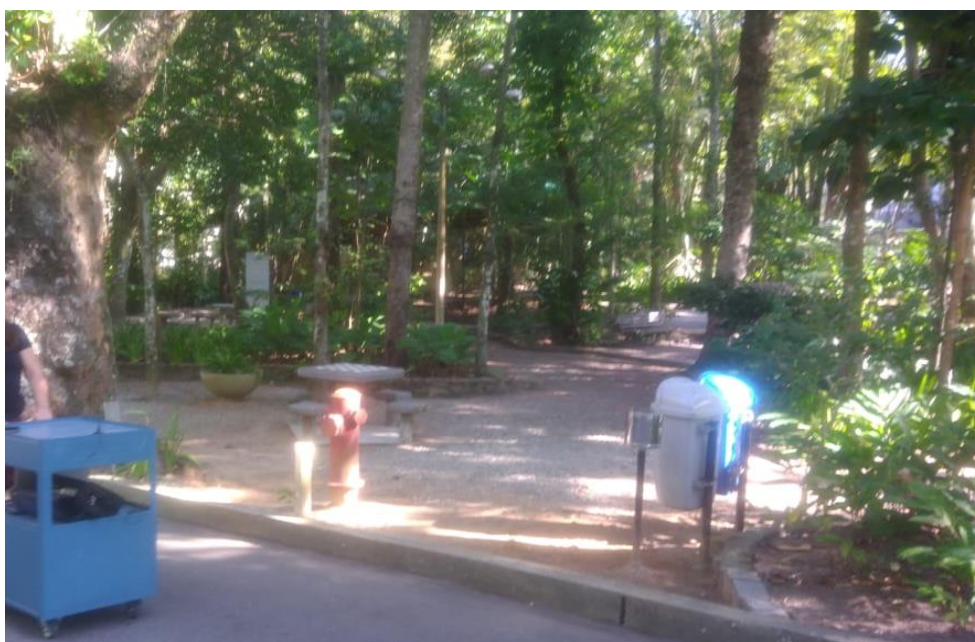
| Distribuições de Probabilidade | Parâmetros | Parâmetros estimados por MLE a partir dos dados empíricos | Erro médio Quadrático entre os valores observados e esperados | Distribuições que passaram no teste do Qui-Quadrado |
|--------------------------------|---------------|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Rayleigh | (σ) | 0,2579 | 2,131 | |
| Rice | (s) | 0,295 | 1,7102 | X |
| | (σ) | 0,152 | | |
| Nakagami | (m) | 1,687 | 1,635 | X |
| | (Ω) | 0,1330 | | |
| Weibull | (λ) | 0,379 | 1,751 | X |
| | (α) | 2,5422 | | |

Fonte: Do Autor.

2) Trecho 2 com visada – Praça da Área de Vivência 2

Esse foi o trecho final da medição da rota executada na Área de Vivência 2. A Figura 40 mostra a praça da Área de Vivência. Apesar de imersa em muita vegetação, havia visada até o final da trilha da praça.

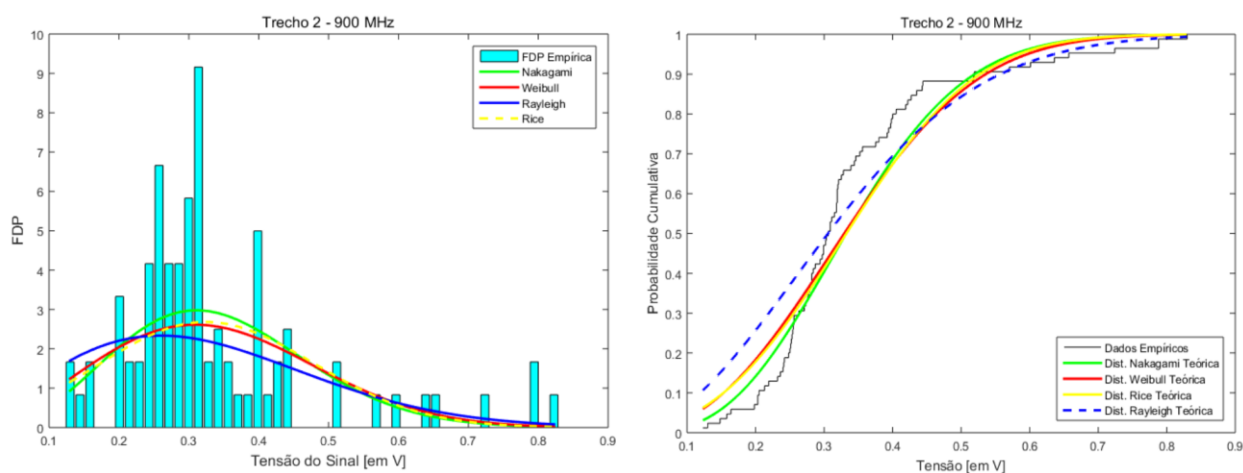
Figura 40: Trecho 2 utilizado para Análise de Variabilidade em Pequena Escala com Visada



Fonte: Do Autor.

A Figura 41 apresenta os Gráficos de PDF e CDF para as medidas realizadas nesse trecho em pequena escala e uma comparação com as FDPs e CDFs teóricas de Rayleigh, Rice, Nakagami e Weibull.

Figura 41: Curvas de PDF e CDF para a Análise em Pequena Escala para 900MHz – Trecho 2 (LOS)



Fonte: Do Autor.

A Tabela 17 apresenta os valores dos parâmetros estimados de cada distribuição por estimadores de máxima verossimilhança; quais das curvas de distribuições de probabilidade passaram no teste do qui-quadrado e o erro médio quadrático entre os valores observados e esperados. Com base nessas informações, foi possível determinar qual seria a distribuição teórica que melhor se ajustou aos dados observados.

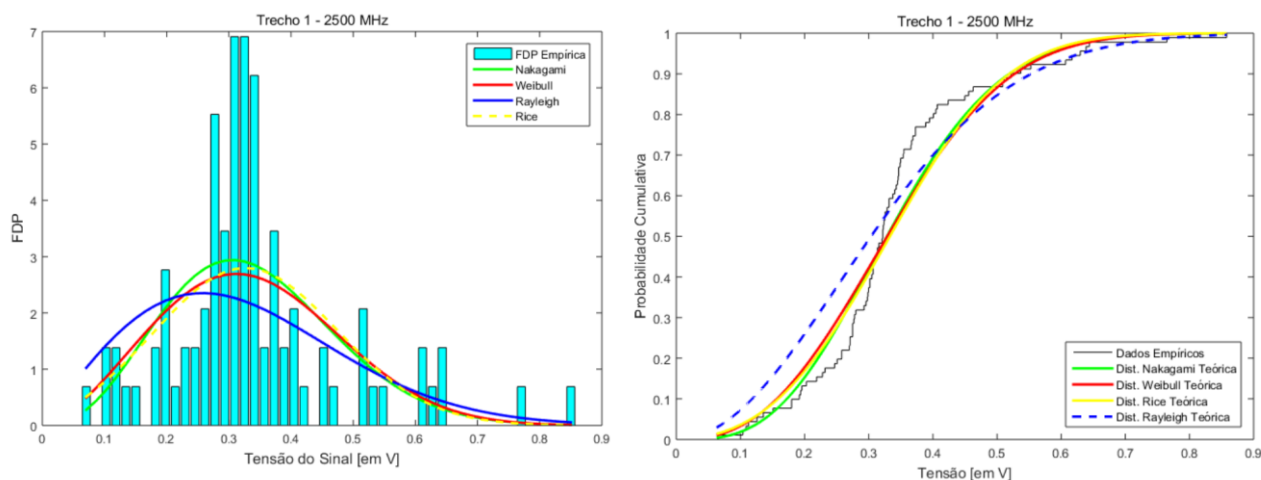
Tabela 17: Informações estatísticas de Pequena Escala para 900 MHz - Trecho 2

| Distribuições de Probabilidade | Parâmetros | Parâmetros estimados por MLE a partir dos dados empíricos | Erro médio Quadrático entre os valores observados e esperados | Distribuições que passaram no teste do Qui-Quadrado |
|--------------------------------|---------------|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Rayleigh | (σ) | 0,2597 | 2,622 | |
| Rice | (s) | 0,289 | 2,481 | X |
| | (σ) | 0,160 | | |
| Nakagami | (m) | 1,764 | 2,285 | X |
| | (Ω) | 0,1349 | | |
| Weibull | (λ) | 0,382 | 2,474 | X |
| | (α) | 2,464 | | |

Fonte: Do Autor.

A Figura 42 apresenta os mesmos gráficos da Figura 41 para as medições em 2500 MHz para o trecho 2.

Figura 42: Curvas de PDF e CDF para a Análise em Pequena Escala para 2500MHz – Trecho 2 (LOS)



Fonte: Do Autor.

A Tabela 18 apresenta as mesmas informações da Tabela 17 para as medições em 2500 MHz para o trecho 2.

Tabela 18: Informações estatísticas de Pequena Escala para 2500 MHz - Trecho 2

| Distribuições de Probabilidade | Parâmetros | Parâmetros estimados por MLE a partir dos dados empíricos | Erro médio Quadrático entre os valores observados e esperados | Distribuições que passaram no teste do Qui-Quadrado |
|--------------------------------|---------------|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Rayleigh | (σ) | 0,2579 | 2,131 | |
| Rice | (s) | 0,295 | 1,7102 | X |
| | (σ) | 0,152 | | |
| Nakagami | (m) | 1,687 | 1,635 | X |
| | (Ω) | 0,1330 | | |
| Weibull | (λ) | 0,379 | 1,751 | X |
| | (α) | 2,5422 | | |

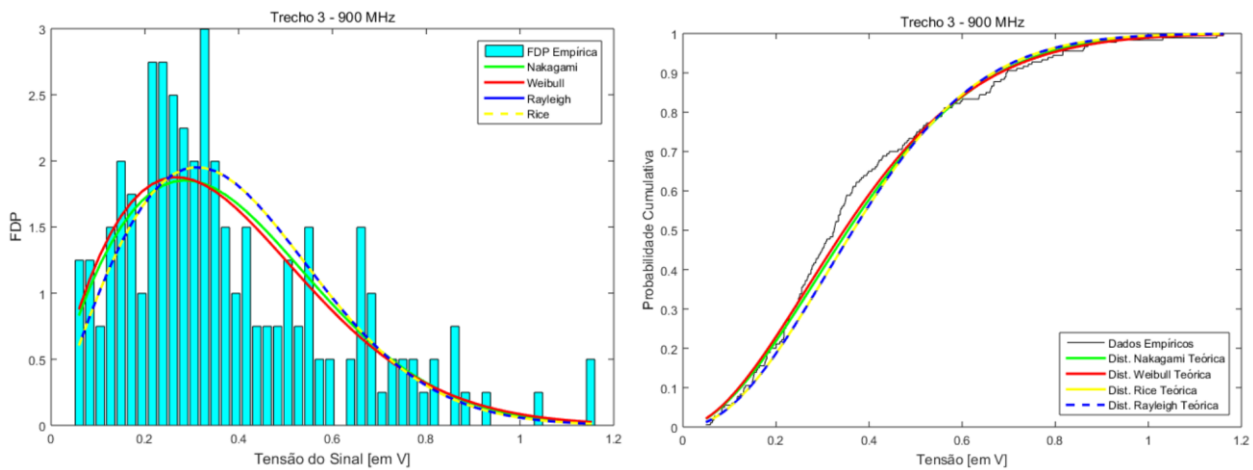
Fonte: Do Autor.

3) Trecho 3 sem visada – Pista por detrás da parede de vegetação

Também foram realizadas medições na Área de Vivência 2 atrás da parede de vegetação na rua que contornava a Área de Vivência. Neste trajeto foi possível analisar os trechos 3 e 4 sem visada com o transmissor.

As Figuras 43 e 44 apresenta os Gráficos de PDF e CDF e uma comparação com as FDPs e CDFs teóricas para as medições de 900 MHz e 2500 MHz, respectivamente. As Tabelas 19 e 20, apresentam apresenta os valores dos parâmetros estimados de cada distribuição para as medições em 900 MHz e 2500 MHz, respectivamente.

Figura 43: Curvas de PDF e CDF para a Análise em Pequena Escala para 900MHz – Trecho 3 (NLOS)



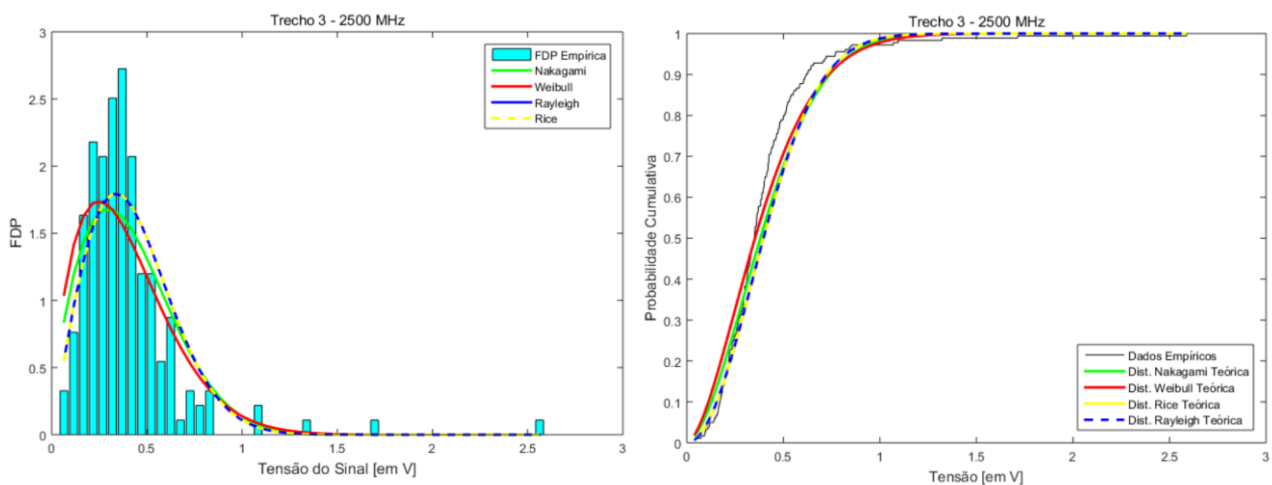
Fonte: Do Autor.

Tabela 19: Informações estatísticas de Pequena Escala para 900 MHz – Trecho3

| Distribuições de Probabilidade | Parâmetros | Parâmetros estimados por MLE a partir dos dados empíricos | Erro médio Quadrático entre os valores observados e esperados | Distribuições que passaram no teste do Qui-Quadrado |
|--------------------------------|---------------|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Rayleigh | (σ) | 0,3107 | 0,2304 | X |
| Rice | (s) | 0,000 | 0,2304 | X |
| | (σ) | 0,311 | | |
| Nakagami | (m) | 0,867 | 0,2081 | X |
| | (Ω) | 0,1931 | | |
| Weibull | (λ) | 0,4258 | 0,1948 | X |
| | (α) | 1,776 | | |

Fonte: Do Autor.

Figura 44: Curvas de PDF e CDF para a Análise em Pequena Escala para 2500MHz – Trecho 3 (NLOS)



Fonte: Do Autor.

Tabela 20: Informações estatísticas de Pequena Escala para 2500 MHz - Trecho 3

| Distribuições de Probabilidade | Parâmetros | Parâmetros estimados por MLE a partir dos dados empíricos | Erro médio Quadrático entre os valores observados e esperados | Distribuições que passaram no teste do Qui-Quadrado |
|--------------------------------|---------------|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Rayleigh | (σ) | 0,3371 | 0,0729 | X |
| Rice | (s) | 0,000 | 0,0729 | X |
| | (σ) | 0,3371 | | |
| Nakagami | (m) | 0,825 | 0,0859 | X |
| | (Ω) | 0,2272 | | |
| Weibull | (λ) | 0,4414 | 0,0892 | X |
| | (α) | 1,637 | | |

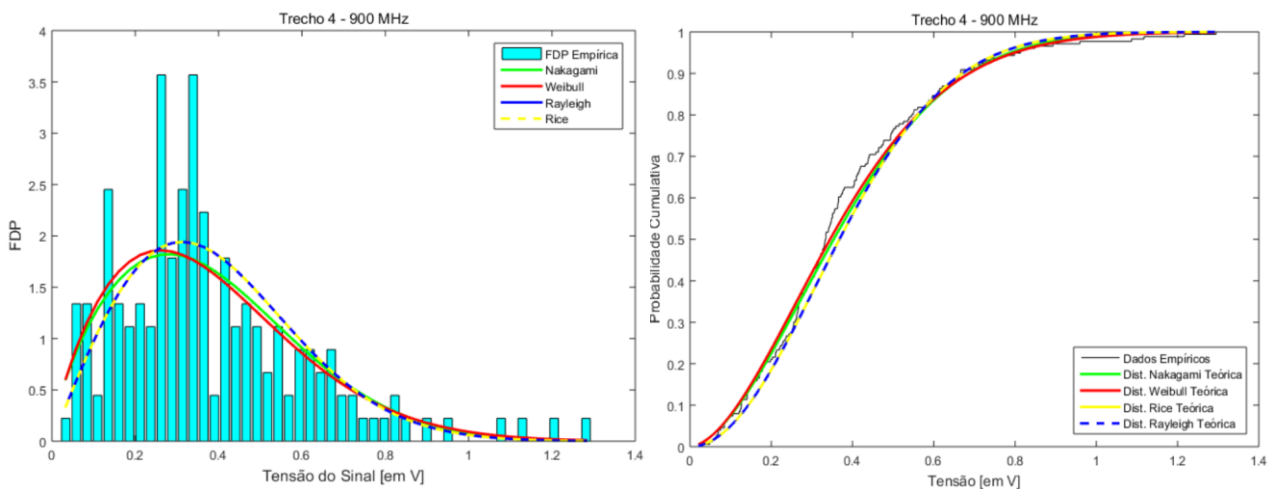
Fonte: Do Autor.

4) Trecho 4 sem visada – Rua entre o Prédio Cardeal Leme e a Área de Vivência 2

Entre a posição onde o transmissor foi colocado e a rua que passa na frente do edifício Cardeal Leme que circundava a Área de Vivência 2 existia uma densa quantidade de vegetação obstruindo a visada entre transmissor e receptor. Esse trecho também foi escolhido para análise da variabilidade em pequena escala em situação de NLOS.

As Figuras 45 e 46 apresenta os Gráficos de PDF e CDF e uma comparação com as FDPs e CDFs teóricas para as medições de 900 MHz e 2500 MHz, respectivamente. As Tabelas 21 e 22, apresentam os valores dos parâmetros estimados de cada distribuição para as medições em 900 MHz e 2500 MHz, respectivamente.

Figura 45: Curvas de PDF e CDF para a Análise em Pequena Escala para 900MHz – Trecho 4 (NLOS)



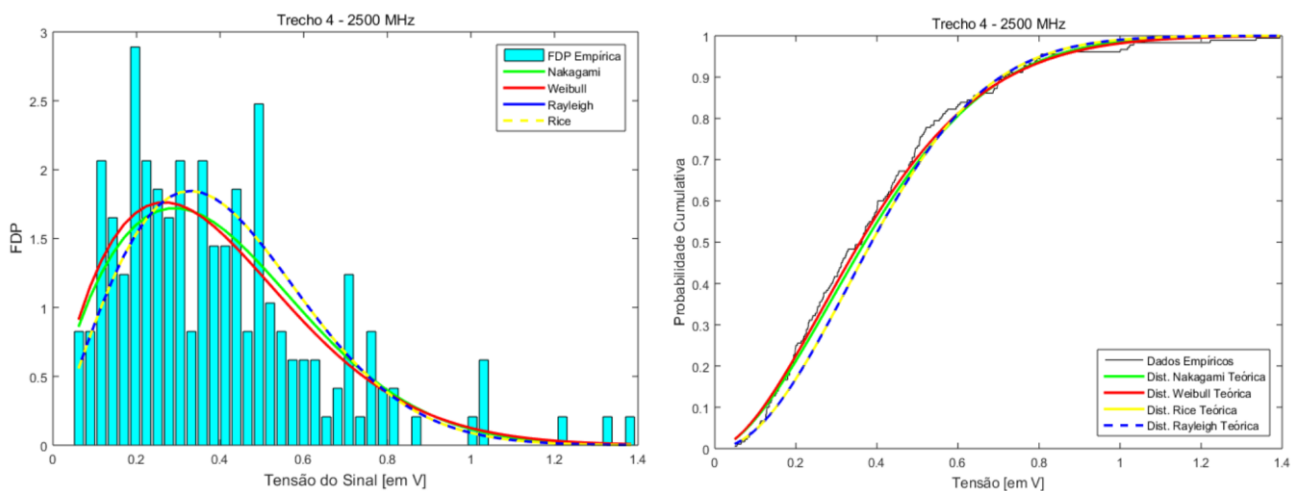
Fonte: Do Autor.

Tabela 21: Informações estatísticas de Pequena Escala para 900 MHz – Trecho4

| Distribuições de Probabilidade | Parâmetros | Parâmetros estimados por MLE a partir dos dados empíricos | Erro médio Quadrático entre os valores observados e esperados | Distribuições que passaram no teste do Qui-Quadrado |
|--------------------------------|---------------|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Rayleigh | (σ) | 0,3123 | 0,2638 | X |
| Rice | (s) | 0,000 | 0,2638 | X |
| | (σ) | 0,312 | | |
| Nakagami | (m) | 0,836 | 0,2585 | X |
| | (Ω) | 0,1951 | | |
| Weibull | (λ) | 0,4255 | 0,2551 | X |
| | (α) | 1,7429 | | |

Fonte: Do Autor.

Figura 46: Curvas de PDF e CDF para a Análise em Pequena Escala para 2500MHz – Trecho 4 (NLOS)



Fonte: Do Autor.

Tabela 22: Informações estatísticas de Pequena Escala para 2500 MHz - Trecho 4

| Distribuições de Probabilidade | Parâmetros | Parâmetros estimados por MLE a partir dos dados empíricos | Erro médio Quadrático entre os valores observados e esperados | Distribuições que passaram no teste do Qui-Quadrado |
|--------------------------------|---------------|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Rayleigh | (σ) | 0,3286 | 0,1812 | X |
| Rice | (s) | 0,000 | 0,1812 | X |
| | (σ) | 0,3286 | | |
| Nakagami | (m) | 0,822 | 0,1568 | X |
| | (Ω) | 0,2159 | | |
| Weibull | (λ) | 0,444 | 0,1473 | X |
| | (α) | 1,709 | | |

Fonte: Do Autor.

Os resultados mostram a concordância com o que está descrito na literatura, que quando há visada entre transmissor e receptor a estatística da variabilidade em pequena escala do sinal recebido devido aos multipercursos, tende a seguir uma distribuição de probabilidade de Rice e quando não existe visada, a distribuição de probabilidade tende a seguir uma estatística de Rayleigh.

Observa-se que, em alguns casos, as estatísticas de Weibull e de Nakagami apresentam valores mais aderentes aos dados empíricos que as funções de Rice e Rayleigh, isso está verificado nas Tabelas 17, 19 e 21 referente aos trechos 2, 3 e 4, respectivamente para a faixa de 900 MHz e também pode ser visto nas Tabela 22 referente ao trecho 4 para a frequência de 2500 MHz.

Nos trechos com visada a curva de Nakagami adere melhor aos dados empíricos das medições de 900MHz e 2500 MHz.

A Tabela 23 apresenta as distribuições de probabilidade que melhor aderiram aos dados empíricos das medições em cada um dos 4 trechos e para cada faixa de frequência.

Tabela 23: Distribuições que melhor se ajustaram aos dados empíricos em cada trecho e em cada frequência

| Trecho | Visada | Frequência | |
|--------|--------|------------|----------|
| | | 900 MHz | 2500 MHz |
| 1 | LOS | Nakagami | Nakagami |
| 2 | LOS | Nakagami | Nakagami |
| 3 | NLOS | Weibull | Rayleigh |
| 4 | NLOS | Weibull | Weibull |

Fonte: Do Autor.

8 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou resultados da caracterização em banda estreita do canal rádio móvel nas frequências de 900 MHz e 2400 MHz em ambientes com predominância de vegetação que se assemelhem as praças e parques públicos. Para isso foram utilizadas duas Áreas de Vivência do Campus da PUC-RJ, região marcada pela forte presença de vegetação e denominadas no trabalho de Áreas de Vivência 1 e 2. Embora a pesquisa tenha o objetivo de caracterizar a faixa de 2400 MHz utilizada por algumas versões do padrão IEEE 802.11, durante a varredura de frequência, optou-se por usar a frequência de portadora CW em 2500 MHz. Isso porque no momento das medições, a faixa mais próxima era a de 2400 MHz pois estava livre de interferências. Considera-se que a pequena distância espectral entre a frequência utilizada e a frequência objetivo, não afeta em nada os resultados pretendidos.

Os dados brutos experimentais coletados no local através de um sondagem do canal com a transmissão de uma onda CW foram posteriormente pós-processados resultando em dados de medidas de potência em diversos pontos das duas Áreas de Vivência, com suas respectivas posições georreferenciadas pelo GPS e assim permitindo a análise de perda de potência com a distância entre o transmissor e o receptor.

A análise em banda estreita foi realizada em cima das características de perda de percurso, da variabilidade do canal em larga escala e em pequena escala. Em larga escala ainda foram analisados os comportamentos de perda de potência e comparado com modelos de predição consagrados para áreas urbanas e modelos específicos para áreas com presença de vegetação. Os modelos para áreas urbanas utilizados nas comparações com os dados empíricos, foram os modelos de Okumura-Hata, COST 231 e o Modelo SUI e os modelos de áreas com vegetação utilizados foram os modelos de Weissberg, Early ITU-R, Fitted ITU-R e COST 235.

Como esperado, na avaliação da perda de percurso do canal nas Áreas de Vivência 1 e 2 obteve-se fatores de atenuação diferentes para as frequências de 900 MHz e 2500 MHz. Em 900 MHz o fator de atenuação resultante foi de 1,68, um valor menor do que o fator de atenuação no espaço livre. Concluiu-se que esse resultado se deve a dois aspectos. O primeiro é que as distâncias percorridas pelo receptor eram muito pequenas e as perdas de propagação em 900 MHz para essas distâncias foram também muito pequenas. O segundo e mais importante aspecto é que possivelmente componentes de multipercurso se somaram de forma construtiva no receptor em locais com visada, instituindo que o sinal em muitos desses pontos com visada, tivessem sua potência aumentada fazendo com que

a perda de propagação fosse menor que a do espaço livre. O fator de atenuação na faixa de 2500 MHz foi de 2,57, fator bem próximo do encontrado em outros estudos [70] [73] também em áreas de vegetação.

A avaliação da variabilidade em larga escala foi realizada sob dois pontos de vista, um relacionado ao comportamento Lognormal nesse desvanecimento e outro em relação a comparação dos dados empíricos com modelos de propagação já consagrados e utilizados. Nesse caso o objetivo era encontrar os modelos que melhor se adequassem as perdas nos ambientes estudados para que pudessem servir de referência de modelos de predição em projetos de parques e praças digitais com implantação de tecnologias IEEE 802.11 nas faixas de 900 MHz e 2400 MHz.

As Figuras 28 e 29 mostraram que o comportamento do desvanecimento em larga escala do sinal em ambas faixas de frequência, possui uma estatística Lognormal, como era de presumir.

Na comparação de perda de potência do sinal nas faixas de 900 MHz e 2500 MHz com os modelos de propagação, inicialmente as perdas reais no canal foram comparadas com as perdas previstas pelo modelo de propagação no espaço livre. Não foi possível separar as medições em pontos com visada e sem visada. Na Figura 31 é possível perceber que em ambas as frequências, alguns pontos medidos, tiveram perdas de potência abaixo das perdas em espaço livre. Entende-se que nesses pontos havia visada com o transmissor e que as contribuições de multipercursos somaram-se aditivamente no receptor.

A comparação de perdas na faixa de 900 MHz com os modelos SUI, Okumura-Hata e COST-231, não apresentaram boa concordância e os erros médio e RMS foram muito elevados.

Na faixa de 2500 MHz, os valores empíricos apresentaram melhor concordância com os modelos de predição para regiões urbanas, sendo o Modelo de Okumura-Hata para regiões suburbanas, aquele que apresentou menor erro médio (9,80) e erro RMS (11,14) na comparação com os dados empíricos.

Na comparação das medições com os modelos específicos para ambientes com vegetação, todos os modelos apresentaram boa concordância com os dados medidos, tanto em 900 MHz como em 2500 MHz. Os resultados de erro médio, desvio padrão e erro RMS são mostrados na Tabela 13.

O modelo Fitted ITU-R, foi dentre todos, aquele que apresentou os menores valores de erro médio e erro RMS para faixa de 900 MHz, seguido pelo modelo de Early ITU-R que também apresentou baixos valores de erros. Ressalta-se que, apesar do modelo Fitted

ITU-R ser usado nas faixas de frequência de 10 a 40 GHz, os resultados mostram que ele pode ser utilizado com segurança na predição de faixas menores como a de 900 MHz.

Embora na faixa de 2500 MHz, o modelo de Okumura-Hata para ambientes suburbanos ter sido dentre todos, o que apresentou melhor aderência as perdas reais do canal, os demais modelos para ambientes com vegetação também apresentaram valores baixos de erros, principalmente o modelo de Weissberg, apresentando valores de 10,18 e 12,09 para erros médio e RMS, respectivamente. Dessa forma, tanto o Modelo de Okumura-Hata para Regiões suburbanas, quanto os modelos para ambientes com vegetação, como o de Weissberg, podem ser utilizados para predições confiáveis de propagação em 2500 MHz no tipo de ambiente estudado.

A análise da variabilidade de pequena escala foi puramente estatística e apenas 2 trechos onde se tinha a certeza de que havia visada entre transmissor e receptor foram analisados. Outros 2 trechos sem visada, foram também analisados com intuito de se investigar se as estatísticas de pequena escala estavam de acordo com a literatura e se outras distribuições de probabilidade podem também servir de referência para a modelagem estatística desse tipo de variabilidade.

Como esperado nos trechos onde havia visada entre transmissor e receptor em ambas as frequências, a estatística da variabilidade em pequena escala do sinal recebido devido aos multipercursos, aderiu bem com a distribuição de probabilidade de Rice e, quando não existia visada, a distribuição estatística da variabilidade em pequena escala foi Rayleigh.

As estatísticas de Weibull e de Nakagami apresentaram valores muito aderentes aos dados empíricos, sendo que a distribuição de Nakagami aderiu melhor aos dados empíricos das medições de 900MHz e 2500 MHz quando havia visada.

8.1 Sugestão de Trabalhos Futuros

Todos esses resultados se fazem importantes e podem ser utilizados por pesquisadores, engenheiros e projetistas de sistemas de comunicação sem fio que utilizem essas frequências e que venham a trabalhar em ambientes com presença de vegetação, mesmo que muitas outras investigações possam ser realizadas:

- 1) Realizar a mesma caracterização banda estreita e obter os mesmos resultados para o canal trabalhando na faixa de 5GHz. Desta forma, as versões do padrão IEEE 802.11 que trabalham nessa faixa poderiam ser contempladas.

- 2) Podem ser realizadas medições em diversos tipos de vegetação e em diversas faixas de frequência para montagem de um modelo específico para o cenário brasileiro.
- 3) Análise de taxas de transmissão de dados para validar o desempenho das redes face a hostilidade do canal rádio nesses tipos de ambientes.

9 BIBLIOGRAFIA

- [1] IEEE 802.11. **Padrões IEEE 802.11 LAN Working Group**. Disponível em <<http://www.ieee802.org/11/>> Acesso em: 27. Jul 2019.
- [2] BEDOR, Arthur Antunes Braga. PEREIRA, Geovane Oliveira. **Sub-1GHz Sensor Network and Smart Metering** 113 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2015/1, Rio de Janeiro, RJ, 2015. Disponível em: < https://www.gta.ufrj.br/grad/15_1/802.11ah/ieee80211ah.html>. Acesso em: 25. abril 2019.
- [3] Theofilos Chrysikos, Giannis Georgopoulos, Stavros Kotsopoulos. **Wireless channel characterization for a home indoor propagation topology at 2.4 GHz**. Wireless Telecommunications Symposium (WTS), New York City, USA, 2011.
- [4] Irfan Ahmed, Sara Orfall, Tamer Khattab, Amr Mohamed. **Characterization of the indoor-outdoor radio propagation channel at 2.4 GHz**. IEEE GCC Conference and Exhibition (GCC), Dubai, United Arab Emirates, 2011.
- [5] SAVAGE, N., D. NDZI, A. SEVILLE, E. VILAR, and J. Austin, “**Radio wave propagation through vegetation: Factors influencing signal attenuation**”, Radio Science, Vol. 38, No. 5, n/a–n/a, Oct. 2003.
- [6] Joshi, G. G., C. B. Dietrich, C. R. Anderson, W. G. Newhall, W. A. Davis, J. Isaacs, and G. Barnett, “**Near-ground channel measurements over line-of-sight and forested paths**”, IEE Proceedings — Microwaves, Antennas and Propagation, Vol. 152, No. 6, 589–596, Dec. 2005.
- [7] Gay-Fernandez, J. A., M. Garcia S´anchez, I. Cuinas, A. V. Alejos, J. G. Sanchez, and J. L. Miranda-Sierra, “**Propagation analysis and deployment of a wireless sensor network in a Forest**”, Progress In Electromagnetics Research, Vol. 106, 121–145, 2010.
- [8] Gay-Fernandez, J. A. and I. Cui˜nas, “**Peer to peer wireless propagation measurements and path-loss modeling in vegetated environments**”. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 61, No. 6, 3302–3311, jun. 2013.
- [9] Oestges, C., B. M. Villaceros, and D. Vanhoenacker-Janvier, “**Radio channel characterization for moderate antenna heights in forest areas**”. IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 58, No. 8, 4031–4035, Oct. 2009.
- [10] Gay-Fern´andez, J. A. and I. Cui˜nas, “**Short-term modeling in vegetation media at wireless network frequency bands**”. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 62, No. 6, 3330–3337, jun. 2014.
- [11] F-C. Yang. **Forest Channel Characterization in the 5 MHz Band**. Master's Thesis, School of EECS, Ohio University, 2008.
- [12] Margit Mutschlechner, Patrick Baldemaier, Philipp Handle and Falko Dressler, “**Wireless in The Woods: Experimental Evaluation of IEEE 802.11a/b/g in Forested**

Environments", Proceedings of 12. GI/ITG KuVS Fachgespräch Drahtlose Sensornetze (FGSN 2013), Cottbus, Germany, September 2013, pp. 5-8.

[13] Seyed Dawood Sajjadi Torshizi, Ka Kien Lo, Kae Hsiang Kwong, Alvin Ting Kee Ngoh, Mazlan Abbas, Fazirulhisyam Hashim, Heng Siong Lim. **An Investigation of Vegetation Effect on the Performance of IEEE 802.11n Technology at 5.18 GHz**. Wireless Communications and Applications (ICWCA), 2012.

[14] V. Dasarathan, M. Muthukumar, K.N. Elankumaran, Bill William Turney, Nick Burris. **Outdoor Channel Measurement, Path - Loss Modelling and System Simulation of 2.4 GHz WLAN IEEE 802.11g in Indian Rural Environments**. Asia-Pacific Microwave Conference. Bangkok, Thailand, 2007.

[15] Jean Louis Fendji, Kedieng Ebongue, Mafai Nelson, Jean Michel Nlong. **Empirical Path Loss Models for 802.11n Wireless networks at 2.4Ghz in rural regions**. IEEE EAI AFRICOMM, 2014.

[16] Stefan Aust, R. Venkatesha Prasad, Ignas G. M. M. Niemegeers. **Outdoor Long-range WLANs: A Lesson for IEEE 802.11ah**. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015.

[17] Ben Bellekens, Le Tian, Pepijn Boer, Maarten Weyn, Jeroen Famaey. **Outdoor IEEE 802.11ah Range Characterization Using Validated Propagation Models**. IEEE GLOBECOM, Singapura, 2017.

[18] EVANS, D. **The Internet of Things – how the next evolution of the Internet is changing everything**. Cisco Internet Business Solutions Group (IBSG). 2011

[19] SIQUEIRA. J.R.P **Análise dos modelos de previsão de cobertura na faixa de 3.5 GHZ utilizados nos sistemas WiMAX**. 2009. 175 f. Dissertação. (Mestrado em Engenharia de telecomunicações) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2009.

[20] CARVALHO, Johnderson Nogueira. **Propagação em áreas urbanas na faixa de UHF: Ampliação ao planejamento de sistemas de TV digital**. 2003. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC - Rio, 2003. Rio de Janeiro, RJ, 2003.

[21] RAMOS, Glauco Lopes. **Medidas de rádio propagação em 3.5 GHz em ambientes urbanos: Análise de perda de percurso e variabilidade**. 2001. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC - Rio, 2001. Rio de Janeiro, RJ, 2001.

[22] RAPPAPORT, Theodore. **Comunicações sem fio: princípio e prática** 2.ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, p.96, 2009.

[23] EISENCRAFT, Márcio. **Propagação de sinais**. p.89, 2004. Disponível em < <http://professor.ufabc.edu.br/marcio.eisencraft/Artigos/PropagacaodeSinais.pdf> >. Acesso em: 28. Mar.2018.

- [24] BATALHÃO, Tiago Barbim[et al]. **Laboratório de Física IV: livro de práticas**. 264p. Instituto de Física de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.
- [25] IBYTES. **Difração**. Disponível em: <https://www.abytes.com.br/a-difracao-das-on-das-eletromagneticas-devido-a-obstaculos/>. Acesso em: 30. jun. 2019.
- [26] FIQUEREDO, Tamara de Britto. **Aplicações das tecnologias sem fio na logística**. 2004. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, RJ, 2004.
- [27] BARRETO, Eduardo Paes. **Caracterização da Perda de Propagação em Região Urbana nas faixas de 2,5 GHz e 3,5 GHz**. 2013. 70 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, RJ, 2013.
- [28] SILVA, Leonardo Henrique Gonsioroski Furtado da Silva da. **Caracterização do Canal de Propagação Banda Larga e Modelagem da Perda e Transmissão através de Edificações em Regiões Urbanizadas na Faixa de 2,5 GHz**. 2013, 202 f. Tese (doutorado) -Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2013, Rio de Janeiro, RJ, 2013.
- [29] ALBINO, Rafael Melo. SANTOS Ana Luíza Dória dos. **Estudo de cobertura do sinal 3G na UFF- Campus Praia Vermelha, bloca H**. 2017. 70 f. Monografia – Universidade Federal Fluminense, Graduação de Engenharia em Telecomunicações, 2017.
- [30] PEREIRA, Marco Antonio Betini. **Análise de modelos de propagação na área urbana da região de Curitiba – PR na faixa de frequência de 1800 MHz**. 2007. 175 f. Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2007.
- [31] PARSONS, J.D. **The Mobile Radio Propagation Channel**. 2 ed. New York: John Wiley and Sons LTD, 2000.
- [32] ERCEG, V.; Greenstein, L.J., et al. **An empirically based path loss model for wireless channels in suburban environments IEEE Journal on Selected Areas of Communications**. Vol. 17 julho, 1999, pp. 1205–1211.
- [33] FALCÃO, Renata Braz. **Estudo e Simulação de Técnicas de Localização de Terminais em Ambientes Micro celulares**. 2003. 97 f. Dissertação - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Mestrado em Engenharia Elétrica, 2003. Rio de Janeiro, RJ, 2003.
- [34] MEZA, Wilyam David Torres. **Caracterização de Canal Rádio Móvel em ambientes suburbanos geograficamente acidentados na faixa de 5.8 GHz**. 2013. 162 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2013. Rio de Janeiro, RJ, 2013.
- [35] GUERRA, Mauricio Vilela. **Caracterização do canal de propagação para redes de tv digital de frequência única**. 2012, 137 f. Tese (doutorado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC- Rio, Departamento de Engenharia Elétrica, 2012, Rio de Janeiro, RJ, 2012.

- [36] HAYKIN, Simon; MOHER, Michael. **Sistemas modernos de comunicações wireless** 1 ed. Porto Alegre: Bookman, 2008.
- [37] BACH, Gabriel Amaral. **Implementação de um analisador de espectro utilizando o conceito Rádio definido por software (SRD)**. 2017. 65 f. Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2017.
- [38] RAPPAPORT, T. S., “**Wireless Communications - Principles and Practice**”. IEEE Press, Inc. New York and Prentice Hall, Inc., New Jersey, 2002
- [39] OKUMURA, Y. “**Field Strength and its Variability in VHF and UHF Land Mobile Radio Service**.” Review of the Electrical Communication Laboratory, Vol 16, No.9-10pp. 825 - 873, 1968.
- [40] COST 231, “**Urban transmission loss models for mobile radio in the 900- and 1,800 MHz bands (Revision 2)**,” COST.
- [41] GONSALVES, Juliana Valim Oliver. **Variabilidade do sinal, banda de coerência e espalhamento temporal em ambiente de Rádio propagação Móvel em 3,5 GHz**. 2009. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2009. Rio de Janeiro, RJ, 2009.
- [42] SILVA, Jean Carneiro da. **Influência Da Vegetação No Desvanecimento E Na Perda De Percorso De Enlaces De Radiocomunicação UHF Na Faixa De 700 MHz**. 247 f. Tese (Doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.
- [43] MATOS, Leni Joaquim de. **Influência na dispersão dos sinais rádio-móveis**. 2005. 215 f. Tese (doutorado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2005 Rio de Janeiro, RJ, 2005.
- [44] MARK, 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.
- [45] OKURO Joel Rufus. LOKE Joel. **Suitability of the Early ITU Model in Parts of Cross River State Nigeria**. 1 Department of Physics, University of Calabar, Calabar – Nigeria 2 Department of Physics, Cross River University of Technology, Calabar – Nigeria. International Journal of Scientific Engineering and Applied Science (IJSEAS) – Volume-4, Issue-9, 2018.
- [46] MO Al-Nuaimi and RBL Stephens. **Measurements and prediction model optimisation for signal attenuation in vegetation media at centimetre wave frequencies**. IEE Proceedings-Microwaves, Antennas and Propagation, 145(3):201–206, 1998. Modelo COST 235.
- [47] MPM Hall. **Cost project 235 activities on radiowave propagation effects on next generation fixed-service terrestrial telecommunication systems**. In Antennas and Propagation, 1993., Eighth International Conference on, pages 655–659. IET, 1993.

[48] GARCIA, L. G. U. **REDES 802.11 (Camada de Enlace)**. 2003. Disponível em: < https://www.gta.ufrj.br/grad/01_2/802-mac/index.html> . Acesso em: 10.Jul 2019.

[49] SAULLO. **IEEE 802.11**. Disponível em: < https://www.gta.ufrj.br/ensino/eel878/redes1-2016-1/16_1_2/saullo/trabalho_redes1/Referencias/IEEE%20802.11.pdf> Acesso em: 22: jul. 2019.

[50] CARROLL, B. J. **CCNA Wireless Official Exam Certification Guide**. Indianapolis: Cisco Press, 2009.

[51] EMMANUEL, Marcio Webler. **Transporte Eficiente de Conteúdo de Vídeo Empregando Agregação de Quadros para Transmissão de fluxos de vídeo Escalável em Redes IEEE 802.11 n**. 139 f. Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2011 Rio de Janeiro, RJ, 2011.

[52] MOURA, Carlos Gomes. **Predição de Campo sem fio**. 110f. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2011.

[53] VINCI, O.; FERREIRA, P. **WiIP Sistema de Comunicação VoIP Wi-Fi**. São Paulo, 2007.

[54] POVOA. Thiago A. **Principais padrões IEEE 802.11**. Disponível em < <https://webpovoa.com/entenda-os-principais-padroes-ieee-802-11/>> Acesso em: 29 jul. 2019

[55] IEEE Std 802.11b-1999 – IEEE Standard for Information Technology Telecommunications and Information Exchange Between Systems – Local and Metropolitan Area Networks – Specific Requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: High-Speed Physical Layer Extension in the 2,4GHz Band.

[56] IEEE Std 802.11a-1999 – IEEE Standard for Information Technology Telecommunications and Information Exchange Between Systems – Local and Metropolitan Area Networks – Specific Requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: High-Speed Physical Layer in the 5GHz Band.

[57] IEEE Std 802.11g-2003 – IEEE Standard for Information Technology Telecommunications and Information Exchange Between Systems – Local and Metropolitan Area Networks – Specific Requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Further Higher Data Rate Extension in the 2,4GHz Band.

[58] NASCIMENTO, Celia Regina; SANTOS Dagoberto dos; SILVEIRA Loreno. **Redes Wi-Fi: padrão IEEE 802.11 n**. Disponível em:< https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialwifi/ieee/pagina_4.asp> Acesso em: 22. Jul 2019

[59] BRITO, Edivaldo. **Diferença entre os padrões de rede wireless B, G e N**. Disponível em: < <https://www.techtudo.com.br/artigos/noticia/2012/10/qual-diferenca-entre-os-padroes-de-rede-wireless-b-g-e-n.html>> Acesso: 01 Agos 2019.

- [60] BATALHA, Iury da Silva. **Estudo da tecnologia IEEE 802.11 ac para o desenvolvimento de modelos empíricos e cross-layer**. 68f. Mestrado (dissertação) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2016.
- [61] PARK, M., (2015). **IEEE 802.11ah: Sub-1-GHz License-Exempt Operation for the Internet of Things**. *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 9, pp. 145-151, September 2015.
- [62] IEEE Standard 802.11ah, 2016 (2017). 802.11ah-2016 - IEEE Approved Draft Standard for Information Technology-Telecommunications and Information Exchange Between Systems-Local and Metropolitan Area Networks-Specific Requirements-Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Amendment 2: Sub 1 GHz License Exempt Operation, IEEE, February 2017.
- [63] ANRITSU CORPORATION. **MG 3710 A Vector Signal Generator**. Disponível em: < <https://www.anritsu.com/en-us/test-measurement/products/mg3710a> >. Acesso em: 15.mai. 2018.
- [64] ANRITSU CORPORATION. **Signal Analyzer Operation Manual**. Disponível em: <https://dl.cdn-anritsu.com/en-au/test-measurement/files/Manuals/Operation-Manual / MS269xA/MS269xA_Mainframe_Operation_Manual_e_46_0.pdf >. Acesso em: 15.mai. 2018.
- [65] METEK. **Microwave Amplifier product AS0204-7**. Disponível em: < https://www.milmega.co.uk/microwave_amplifier_product.php?p=234&cat=Modules%20and%20Kits&np=1 > Acesso em: 05. Abr. 20018.
- [66] MARK Mobile. **Antenna MGRM-WLF-1C10**. Disponível em: < <https://www.theantennafarm.com/catalog/mobile-mark-mgrm-wlf-1c10-3266> > Acesso em: 25. Maio. 2018.
- [67] WENTEQ. **Microwave Corp. Broad Band Low Noise Amplifier ABL0800-12-3315**. < <http://www.wenteq.com/Amplifier-PDF/ABL0800-12-3315.pdf> >. Acesso em: 28 abr. 2018.
- [68] GARMIN. **GPSMAP62**. Disponível em: < <https://buy.garmin.com/pt-BR/BR/p/63800> >. Acesso em: 28 abr. 2018.
- [69] AFRIC, W.; ZOVKO-CIHLAR, B.; GRGIC, S. **Methodology of Path Loss Calculation using Measurement Results**. *IEEE Transactions on Communications*, v. 50, p. 495-502, mar 2007.
- [70] Aremu, O.A., Adelek,J.T., Odepidan, K.O., Kolawole, T. (2017). **Estimation and Modelling of Radio Signal Attenuation using Pathloss Exponent at Microwave Band**. *Internatinal Journal of Trend in Research and Development*. vol. 4 (3). Pp. 337-340.
- [71] Y. S. Meng, Y. H. Lee, and B. C. Ng, **Study of propagation loss prediction in forest environment**, *Progress In Electromagnetics Research B*, Vol. 17, 117-133, 2009.

[72] Z. Nadir, N. Elfadhil, and F. Touati, **Pathloss Determination Using Okumura-Hata Model And Spline Interpolation For Missing Data For Oman**, World Congress on Engineering (WCE 2008), July 2 - 4, 2008, London, U.K.

[73] K. L. Chee, S. A. Torrico, and T. Kurner, **Radiowave Propagation Prediction in Vegetated Residential Environments**, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Volume: 62, Issue: 2, pp. 486 – 499, Feb. 2013

ANEXO A - Código Desenvolvido para Caracterização Banda Estreita

```

%%
% Programa elaborado para Caracterização do Canal Banda Estreita

% 900
%% Carregar sinal recebido
Sinal_Recebido=dlmread('C:\Users\Amanda\Documents\Dissertação de
Mestrado\Medidas 900\Resultados de Pos Processamento\Sinal_Rece-
bido.txt');
tam_SR=size(Sinal_Recebido);

%% Cálculo da EiRP
% TRANSMISSOR
PotOut= 13;
%Potência de saída do MG3700A em dBm
LossCabo1 = 1.5;
%Perda do cabo entre MG3700A e Amplificador em dB
GainAmplifier = 0;
%Ganho do Amplificador em dB
LossCabo2 = 1.8;
%Perda do Cabo entre Amplificador e antena em dB
GainAnt = 3;
%Ganho da Antena em dBi (Checar Valor)
Eirp = PotOut+GainAmplifier+GainAnt-LossCabo1-LossCabo2; %Potência
Efetiva Isotropicamente Irradiada em dBm

% RECEPTOR
G_LNA=0;
%Ganho de LNA em dB
G_Antena=3;
%Ganho da antena em dBi
LossCabo2=1.8;

% Determinação do Gráfico de Perda de Potência x Distância
Matriz_Dist_Pot2=[Sinal_Recebido(:,4)./1000 (Sinal_Recebido(:,5)-
G_LNA-G_Antena+LossCabo2) Sinal_Recebido(:,1)];
Matriz_Dist_Pot=sortrows(Matriz_Dist_Pot2,1);
Matriz_Dist_Pot=[Matriz_Dist_Pot ones(tam_SR(1),1)*Eirp];
tam_SR=size(Matriz_Dist_Pot);

for i=1:tam_SR(1)
    Perda_Percurso(i,1)=Matriz_Dist_Pot(i,4)-Ma-
triz_Dist_Pot(i,2)+20;
end

%% Cálculo da Perda no Espaço Livre

Lfs=32.44+20*log10((Matriz_Dist_Pot(:,1)))+20*log10(900);
figure(1)
plot(Matriz_Dist_Pot(:,1)*1000,Perda_Percurso(:,1),'k.')
hold on
plot(Matriz_Dist_Pot(:,1)*1000,Lfs(:,1),'r')
title('Perda de Potência versus Distância - LOS e NLOS')
ylabel('Perda de Potência em [dB]')
xlabel('Distância em [km]')

%% Cálculo do Erro Médio, Desvio Padrão e Erro RMS PARA ESPAÇO LIVRE

```

```

%Cálculo das Atenuações
Lfs=32.44+20*log10((Matriz_Dist_Pot(:,1)))+20*log10(900)

somotorio1=0;
for i=1:length(Lfs)
    somatorio1=somotorio1+(abs(Lfs(i))-Perda_Percurso(i));
end
Erro_Medio_EL_1=(somotorio1)/length(Lfs);

somotorio1=0;
for i=1:length(Lfs)
    somatorio1=somotorio1+((abs(Lfs(i))-Perda_Percurso(i))-Erro_Me-
dio_EL_1)^2);
end
Desvio_Padrao_EL_1=sqrt(somotorio1/(length(Lfs)-1));

Erro_RMS_EL_1=sqrt(Erro_Medio_EL_1^2+Desvio_Padrao_EL_1^2)

%% Programa para simulação do Modelo de SUI
%frequencia de operação entre 1900MHz e 3500MHz
f=900;
%ponto de referencia em relação a BS = 0.1 Km
d0=50;
%distancia variando de d0 a 3.5 km
d=50:200;
%altura receptor entre 2 e 10m
hr=1.5;
%altura BS entre 10 e 80m
hb=5;
%comprimento de onde - em função da freq
lambda=300/(f);
%case 1
Terreno1='Montanhosos com alta vegetação' ;
a1=4.6;
b1=0.0075;
c1=12.6;
gama1=a1-b1*hb+(c1/hb);
mi1=10.6;
%case 2
Terreno2='Semiplano com media vegetação' ;
a2=4;
b2=0.0065 ;
c2=17.1 ;
gama2=a2-b2*hb+(c2/hb);
mi2=9.6;
%case 3
Terreno3='Plano com baixa vegetação' ;
a3=3.6;
b3=0.005;
c3=20;
gama3=a3-b3*hb+(c3/hb);
mi3=8.2;
%Xh = fator de correção da altura da antena receptora
Xh1=-10.8*log10(hr/2);
Xh2=-10.8*log10(hr/2);
Xh3=-20.0*log10(hr/2);
%Xf = fator de correção de frequencia
Xf=6*log10(f/2000); % ok
%Cálculo de A
A=20*log10((4*pi*d0)/lambda);
%Cálculo das Atenuações

```

```

PL1=A+10*gama1*log10(d/d0)+Xf+Xh1; %+s1;
PL2=A+10*gama2*log10(d/d0)+Xf+Xh2; %+s2;
PL3=A+10*gama3*log10(d/d0)+Xf+Xh3-5; %+s3;
figure(2);
plot(d, PL1, '-.k', d, PL2, 'b', d, PL3, ':k');
hold on
plot(Matriz_Dist_Pot(1:end,1)*1000, Perda_Percurso(1:end,1), 'k. ');
%plot(Matriz_Dist_Pot(:,1)*1000, Lfs(:,1), 'r')

title('Comparação de Resultados Empíricos com Modelo SUI - LOS e
NLOS')
xlabel('Distância [em km]')
ylabel('Perda de Potência [em dB]')
legend(Terreno1, Terreno2, Terreno3, 1)
grid

% Cálculo do Erro Médio, Desvio Padrão e Erro RMS PARA SUI
% Cálculo das Atenuações
PL1s=A+10*gama1*log10(d/d0)+Xf+Xh1; %+s1;
PL2s=A+10*gama2*log10(d/d0)+Xf+Xh2; %+s2;
PL3s=A+10*gama3*log10(d/d0)+Xf+Xh3-5; %+s3;

somatorio1=0;
somatorio2=0;
somatorio3=0;
for i=1:length(PL1s)
    somatorio1=somatorio1+(abs(PL1s(i)-Perda_Percurso(i)));
    somatorio2=somatorio2+(abs(PL2s(i)-Perda_Percurso(i)));
    somatorio3=somatorio3+(abs(PL3s(i)-Perda_Percurso(i)));
end
Erro_Medio_SUI_1=(somatorio1)/length(PL1s);
Erro_Medio_SUI_2=(somatorio2)/length(PL1s);
Erro_Medio_SUI_3=(somatorio3)/length(PL1s);

somatorio1=0;
somatorio2=0;
somatorio3=0;
for i=1:length(PL1s)
    somatorio1=somatorio1+((abs(PL1s(i)-Perda_Percurso(i))-Erro_Me-
dio_SUI_1)^2);
    somatorio2=somatorio2+((abs(PL2s(i)-Perda_Percurso(i))-Erro_Me-
dio_SUI_2)^2);
    somatorio3=somatorio3+((abs(PL3s(i)-Perda_Percurso(i))-Erro_Me-
dio_SUI_3)^2);
end
Desvio_Padrao_SUI_1=sqrt(somatorio1/(length(PL1s)-1));
Desvio_Padrao_SUI_2=sqrt(somatorio2/(length(PL1s)-1));
Desvio_Padrao_SUI_3=sqrt(somatorio3/(length(PL1s)-1));

Erro_RMS_SUI_1=sqrt(Erro_Medio_SUI_1^2+Desvio_Padrao_SUI_1^2)
Erro_RMS_SUI_2=sqrt(Erro_Medio_SUI_2^2+Desvio_Padrao_SUI_2^2)
Erro_RMS_SUI_3=sqrt(Erro_Medio_SUI_3^2+Desvio_Padrao_SUI_3^2)

%% Modelo de Hata-Okumura
%frequencia de operacao: entre 150MHz e 3000MHz
f=900;
%distancia variando entre o receptor e a BS de 1 a 3.5km
d=0.05:0.01:0.2;
%altura receptor: entre 1 e 10m
hr=1.5;

```

```

%altura BS: entre 30 e 200m
hb=5;
% Fator de correção do receptor
ahr1=3.20*(log10(11.75*hr))^2-4.99;
ahr2=((1.11*log10(f)-0.7)*hr)-(1.56*log10(f)-0.8);
asuburb=-2*((log10(f/28))^2)-5.4;
% Cálculos da Atenuação
PL1=69.55 + 26.16*log10(f) - 13.82*log10(hb) + (44.9 -
(6.55*log10(hb)))*log10(d) - ahr1;
PL2=69.55 + 26.16*log10(f) - 13.82*log10(hb) + (44.9 -
(6.55*log10(hb)))*log10(d) - ahr2;
PL3=69.55 + 26.16*log10(f) - 13.82*log10(hb) + (44.9 -
(6.55*log10(hb)))*log10(d) +asuburb;
Terreno1='Urbano: Grandes cidades, com muitos prédios';
Terreno2='Urbano: Pequenas e médias cidades' ;
Terreno3='Suburbana: cidades com poucos prédios';
Terreno4='Rural: região com pouca obstrução' ;
figure(3);
plot(d*1000,PL1,'--k',d*1000,PL2,'-.b',d*1000,PL3,'--g');
hold on
plot(Matriz_Dist_Pot(:,1)*1000,Perda_Percurso,'k. ');
plot(Matriz_Dist_Pot(:,1)*1000,Lfs(:,1),'r')
title('Comparação de Resultados Empíricos com Modelo Okumura-Hata -
LOS e NLOS')
xlabel('Distância [em km]')
ylabel('Perda de Potência [em dB]')
legend(Terreno1,Terreno2,Terreno3,1)
grid

% Cálculo do Erro Médio, Desvio Padrão e Erro RMS PARA OKUMURA
% Cálculos da Atenuação
PL1o=69.55 + 26.16*log10(f) - 13.82*log10(hb) + (44.9 -
(6.55*log10(hb)))*log10(d) - ahr1;
PL2o=69.55 + 26.16*log10(f) - 13.82*log10(hb) + (44.9 -
(6.55*log10(hb)))*log10(d) - ahr2;
PL3o=69.55 + 26.16*log10(f) - 13.82*log10(hb) + (44.9 -
(6.55*log10(hb)))*log10(d) +asuburb;

somatorio1=0;
somatorio2=0;
somatorio3=0;
for i=2:length(PL1o)
    somatorio1=somatorio1+(abs(PL1o(i)-Perda_Percurso(i)));
    somatorio2=somatorio2+(abs(PL2o(i)-Perda_Percurso(i)));
    somatorio3=somatorio3+(abs(PL3o(i)-Perda_Percurso(i)));
end
Erro_Medio_OKU_1=(somatorio1)/length(PL1o);
Erro_Medio_OKU_2=(somatorio2)/length(PL1o);
Erro_Medio_OKU_3=(somatorio3)/length(PL1o);

somatorio1=0;
somatorio2=0;
somatorio3=0;
for i=2:length(PL1o)
    somatorio1=somatorio1+((abs(PL1o(i)-Perda_Percurso(i))-Erro_Me-
dio_OKU_1)^2);
    somatorio2=somatorio2+((abs(PL2o(i)-Perda_Percurso(i))-Erro_Me-
dio_OKU_2)^2);
    somatorio3=somatorio3+((abs(PL3o(i)-Perda_Percurso(i))-Erro_Me-
dio_OKU_3)^2);
end

```

```

Desvio_Padrao_OKU_1=sqrt(somatorio1/(length(PL1o)-1));
Desvio_Padrao_OKU_2=sqrt(somatorio2/(length(PL1o)-1));
Desvio_Padrao_OKU_3=sqrt(somatorio3/(length(PL1o)-1));

Erro_RMS_OKU_1=sqrt(Erro_Medio_OKU_1^2+Desvio_Padrao_OKU_1^2)
Erro_RMS_OKU_2=sqrt(Erro_Medio_OKU_2^2+Desvio_Padrao_OKU_2^2)
Erro_RMS_OKU_3=sqrt(Erro_Medio_OKU_3^2+Desvio_Padrao_OKU_3^2)

%% Programa para simulação do Modelo de Hata COST 231
%frequencia de operação: entre 150MHz e 2000MHz
f=900;
%distancia variando de 1 a 20km entre o receptor e a BS
d=0.05:0.01:0.2;
%altura receptor: entre 1 e 10m
hr=1.5;
%altura BS: entre 30 e 200m
hb=5;
% Fator de correção do receptor
cm1=3;
cm2=0;
cm3=0;
ahr1=3.20*(log10(11.75*hr))^2-4.99;
ahr2=(1.11*log10(f)-0.7)*hr-(1.56*log10(f)-0.8);
asuburb=-2*(log10(f/28))^2-5.4;
% Cálculo das Atenuações
PL1=46.3 + 33.9*log10(f) - 13.82*log10(hb) + (44.9 -
(6.55*log10(hb)))*log10(d) - ahr1 + cm1;
PL2=46.3 + 33.9*log10(f) - 13.82*log10(hb) + (44.9 -
(6.55*log10(hb)))*log10(d) - ahr2 + cm2;
PL3=46.3 + 33.9*log10(f) - 13.82*log10(hb) + (44.9 -
(6.55*log10(hb)))*log10(d) + cm3 + asuburb;
Terreno1='Urbano: Grandes cidades, com muitos prédios';
Terreno2='Urbano: Pequenas e médias cidades' ;
Terreno3='Suburbana: cidades com poucos prédios' ;
figure(4);
plot(d*1000,PL1,'--k',d*1000,PL2,'-.b',d*1000,PL3,':g');
hold on
plot(Matriz_Dist_Pot(:,1)*1000,Perda_Percurso,'k. ');
plot(Matriz_Dist_Pot(:,1)*1000,Lfs(:,1),'r')
title('Comparação com o Modelo de Hata-COST 231')
xlabel('Distância entre Tx e Rx em [m]')
ylabel('Perda de Potência [em dB]')
legend(Terreno1,Terreno2,Terreno3,1)
grid

% Cálculo do Erro Médio, Desvio Padrão e Erro RMS PARA COST
% Cálculo das Atenuações
PL1c=46.3 + 33.9*log10(f) - 13.82*log10(hb) + (44.9 -
(6.55*log10(hb)))*log10(d) - ahr1 + cm1;
PL2c=46.3 + 33.9*log10(f) - 13.82*log10(hb) + (44.9 -
(6.55*log10(hb)))*log10(d) - ahr2 + cm2;
PL3c=46.3 + 33.9*log10(f) - 13.82*log10(hb) + (44.9 -
(6.55*log10(hb)))*log10(d) + cm3 + asuburb;

somatorio1=0;
somatorio2=0;
somatorio3=0;
for i=2:length(PL1c)
    somatorio1=somatorio1+(abs(PL1c(i)-Perda_Percurso(i)));
    somatorio2=somatorio2+(abs(PL2c(i)-Perda_Percurso(i)));

```

```

        somatorio3=somatorio3+(abs(PL3c(i)-Perda_Percurso(i)));
    end
    Erro_Medio_COST_1=(somatorio1)/length(PL1c);
    Erro_Medio_COST_2=(somatorio2)/length(PL1c);
    Erro_Medio_COST_3=(somatorio3)/length(PL1c);

    somatorio1=0;
    somatorio2=0;
    somatorio3=0;
    for i=2:length(PL1c)
        somatorio1=somatorio1+((abs(PL1c(i)-Perda_Percurso(i))-Erro_Me-
        dio_COST_1)^2);
        somatorio2=somatorio2+((abs(PL2c(i)-Perda_Percurso(i))-Erro_Me-
        dio_COST_2)^2);
        somatorio3=somatorio3+((abs(PL3c(i)-Perda_Percurso(i))-Erro_Me-
        dio_COST_3)^2);
    end
    Desvio_Padiao_COST_1=sqrt(somatorio1/(length(PL1c)-1));
    Desvio_Padiao_COST_2=sqrt(somatorio2/(length(PL1c)-1));
    Desvio_Padiao_COST_3=sqrt(somatorio3/(length(PL1c)-1));

    Erro_RMS_COST_1=sqrt(Erro_Medio_COST_1^2+Desvio_Padiao_COST_1^2)
    Erro_RMS_COST_2=sqrt(Erro_Medio_COST_2^2+Desvio_Padiao_COST_2^2)
    Erro_RMS_COST_3=sqrt(Erro_Medio_COST_3^2+Desvio_Padiao_COST_3^2)

    %% Programa para simulação do Modelo de WeissBerg
    %frequencia de operação: entre 230MHz e 96GHz
    f=900;
    %distancia variando de até 400 m entre o receptor e a BS
    d=0.05:0.01:0.2;
    %altura receptor: entre 1 e 10m
    hr=1.5;
    %altura BS: entre 30 e 200m
    hb=8;

    PLW =
    1.33*(f/1000).^ (0.284)*d*1000.^ (0.588)+32.44+20*log10(d)+(20*log10(f
    ));

    Terreno3='Modelo de Weissberg';
    figure(5);
    plot(d*1000,PLW,'--b');
    hold on
    plot(Matriz_Dist_Pot(:,1)*1000,Perda_Percurso,'k. ');
    plot(Matriz_Dist_Pot(:,1)*1000,Lfs(:,1),'r')
    title('Comparação com o Modelo de Weissberg')
    xlabel('Distância entre Tx e Rx em [m]')
    ylabel('Perda de Potência [em dB]')
    legend(Terreno1,1)
    grid

    % Cálculo do Erro Médio, Desvio Padrão e Erro RMS para Weissberg
    %Cálculo das Atenuações
    PLW =
    1.33*(f/1000).^ (0.284)*d*1000.^ (0.588)+32.44+20*log10(d)+(20*log10(f
    ));

    somatorio1=0;
    for i=1:length(PLW)
        somatorio1=somatorio1+(abs(PLW(i)-Perda_Percurso(i)));
    end

```

```

end
Erro_Medio_Weiss_1=(somatorio1)/length(PLW);

somatorio1=0;
for i=1:length(PLW)
    somatorio1=somatorio1+((abs(PLW(i))-Perda_Percurso(i))-Erro_Me-
dio_Weiss_1)^2);
end
Desvio_Padrao_Weiss_1=sqrt(somatorio1/(length(PLW)-1));

Erro_RMS_Weiss_1=sqrt(Erro_Medio_Weiss_1^2+Desvio_Padrao_Weiss_1^2)

%% Programa para simulação do Modelo de Cost 235
%frequencia de operação: entre 230MHz e 96GHz
f=900;
%distancia variando de até 400 m entre o receptor e a BS
d=0.05:0.01:0.2;
%altura receptor: entre 1 e 10m
hr=1.5;
%altura BS: entre 30 e 200m
hb=8;

PL235 =15.6*(f).^(-0.009)*d.^(0.26)+32.44+20*log10(d)+(20*log10(f));

Terreno3='Modelo COST 235';
figure(6);
plot(d*1000,PL235,'--b');
hold on
plot(Matriz_Dist_Pot(:,1)*1000,Perda_Percurso,'k. ');
plot(Matriz_Dist_Pot(:,1)*1000,Lfs(:,1),'r')
title('Comparação com o Modelo COST 235')
xlabel('Distância entre Tx e Rx em [m]')
ylabel('Perda de Potência [em dB]')
legend(Terreno1,1)
grid

% Cálculo do Erro Médio, Desvio Padrão e Erro RMS para Weissberg
%Cálculo das Atenuações
PL235 = 15.6*(f).^(-
0.009)*d.^(0.26)+32.44+20*log10(d)+(20*log10(f));

somatorio1=0;
for i=1:length(PL235)
    somatorio1=somatorio1+(abs(PL235(i))-Perda_Percurso(i));
end
Erro_Medio_235_1=(somatorio1)/length(PL235);

somatorio1=0;
for i=1:length(PL235)
    somatorio1=somatorio1+((abs(PL235(i))-Perda_Percurso(i))-Erro_Me-
dio_235_1)^2);
end
Desvio_Padrao_235_1=sqrt(somatorio1/(length(PL235)-1));

Erro_RMS_235_1=sqrt(Erro_Medio_235_1^2+Desvio_Padrao_235_1^2)

%% Programa para simulação do Modelo Early ITU
%frequencia de operação: entre 200MHz e 95GHz
f=900;
%distancia menores que 400 m entre o receptor e a BS
d=0.05:0.01:0.2;

```



```

%altura receptor: entre 1 e 10m
hr=1.5;
%altura BS: entre 30 e 200m
hb=8;

PL_EarlyITU
=0.2*(f).^ (0.3)*d.^ (0.6)+32.44+20*log10 (d)+(20*log10 (f));

Terreno3='Modelo Early ITU';
figure(7);
plot(d*1000,PL_EarlyITU,'--b');
hold on
plot(Matriz_Dist_Pot(:,1)*1000,Perda_Percurso,'k. ');
plot(Matriz_Dist_Pot(:,1)*1000,Lfs(:,1),'r')
title('Comparação com o Modelo Early ITU')
xlabel('Distância entre Tx e Rx em [m]')
ylabel('Perda de Potência [em dB]')
legend(Terreno1,1)
grid

% Cálculo do Erro Médio, Desvio Padrão e Erro RMS para Early ITU
%Cálculo das Atenuações
PL_EarlyITU
=0.2*(f).^ (0.3)*d.^ (0.6)+32.44+20*log10 (d)+(20*log10 (f));

somatorio1=0;
for i=1:length(PL_EarlyITU)
    somatorio1=somatorio1+(abs(PL_EarlyITU(i)-Perda_Percurso(i)));
end
Erro_Medio__EarlyITU_1=(somatorio1)/length(PL_EarlyITU);

somatorio1=0;
for i=1:length(PL_EarlyITU)
    somatorio1=somatorio1+((abs(PL_EarlyITU(i)-Perda_Percurso(i))-
Erro_Medio__EarlyITU_1)^2);
end
Desvio_Padrao__EarlyITU_1=sqrt(somatorio1/(length(PL_EarlyITU)-1));

Erro_RMS__EarlyITU_1=sqrt(Erro_Medio__EarlyITU_1^2+Desvio_Pa-
drao__EarlyITU_1^2)

%% Programa para simulação do Modelo FITU-R
%frequencia de operação: entre 11,2 GHz e 20GHz
f=900;
%distancia menores que 400 m entre o receptor e a BS
d=0.05:0.01:0.2;
%altura receptor: entre 1 e 10m
hr=1.5;
%altura BS: entre 30 e 200m
hb=8;

PL_FITUR
=0.39*(f).^ (0.39)*d.^ (0.25)+32.44+20*log10 (d)+(20*log10 (f));

Terreno3='Modelo FITU-R';
figure(8);
plot(d*1000,PL_FITUR,'--b');
hold on
plot(Matriz_Dist_Pot(:,1)*1000,Perda_Percurso,'k. ');
plot(Matriz_Dist_Pot(:,1)*1000,Lfs(:,1),'r')
title('Comparação com o Modelo Fitted ITU-R')

```

```

xlabel('Distância entre Tx e Rx em [m]')
ylabel('Perda de Potência [em dB]')
legend(Terreno1,1)
grid

% Cálculo do Erro Médio, Desvio Padrão e Erro RMS para FITUR-R
%Cálculo das Atenuações
PL_FITUR
=0.39*(f).^ (0.39)*d.^ (0.25)+32.44+20*log10(d)+(20*log10(f));

somatorio1=0;
for i=1:length(PL_FITUR)
    somatorio1=somatorio1+(abs(PL_FITUR(i)-Perda_Percurso(i)));
end
Erro_Medio_FITUR_1=(somatorio1)/length(PL_FITUR);

somatorio1=0;
for i=1:length(PL_FITUR)
    somatorio1=somatorio1+((abs(PL_FITUR(i)-Perda_Percurso(i))-
Erro_Medio_FITUR_1)^2);
end
Desvio_Padrao_FITUR_1=sqrt(somatorio1/(length(PL_FITUR)-1));

Erro_RMS_FITUR_1=sqrt(Erro_Medio_FITUR_1^2+Desvio_Padrao_FITUR_1^2)

%% Curva de Distribuição de probabilidade Cumulativa
p=sort(Perda_Percurso');
maximo=max(p);
minimo=min(p);
vetor=[minimo:0.1:maximo maximo];
tam_p=size(p);
percentual=(1/tam_p(2));
k=1;
for i=vetor
    dist_cum(k)=length(find(p<i))*percentual;
    k=k+1;
end
figure(10)
plot(vetor,dist_cum)
title('Distribuição Cumulativa de Perda de Potência para Região da
Lagoa - LOS e NLOS')
xlabel('Perda de Potência [em dB]')
ylabel('Probabilidade Cumulativa')

clear minimo maximo percentual

%
hold on
% CDF LogNormal Teórica
x = linspace(min(Perda_Percurso),max(Perda_Percurso),375);
param_LOG = mle(Perda_Percurso,'distribution','logn');
L = logncdf(x,param_LOG(1),param_LOG(2));

% CDF Weibull Teórica
param_WEIBUL = mle(Perda_Percurso,'distribution','wbl');
w=wblcdf(x,param_WEIBUL(1),param_WEIBUL(2));

% CDF Nakagami Teórica
param_Nakagami = mle(Perda_Percurso,'distribution','nakagami');
n = cdf('nakagami',x,param_Nakagami(1),param_Nakagami(2));

```

```

%CDF Rice Teórica
phat = mle(Perda_Percurso, 'distribution', 'rician');
r = cdf('rician', x, phat(1), phat(2));

% Plotar tudo
plot(x, L, x, w, x, n, x, r)
legend('Dados Empíricos', 'Dist. LogNormal Teórica', 'Dist. Weibull
Teórica', 'Dist. Nakagami Teórica', 'Dist. Rice Teórica', 'Loca-
tion', 'NW')

% calculo do Desvio

somatorio=0;
for i=1:length(dist_cum)
    somatorio=somatorio+abs(dist_cum(i)-L(i));
end
desvioL=(somatorio)/length(dist_cum)

somatorio=0;
for i=1:length(dist_cum)
    somatorio=somatorio+abs(dist_cum(i)-w(i));
end
desviow=(somatorio)/length(dist_cum)

somatorio=0;
for i=1:length(dist_cum)
    somatorio=somatorio+abs(dist_cum(i)-n(i));
end
desvion=(somatorio)/length(dist_cum)

somatorio=0;
for i=1:length(dist_cum)
    somatorio=somatorio+abs(dist_cum(i)-r(i));
end
desvior=(somatorio)/length(dist_cum)
% calculo do erro médio quadrático

somatorio=0;
for i=1:length(dist_cum)
    somatorio=somatorio+((dist_cum(i)-L(i))^2);
end
QMEL=(somatorio)/length(dist_cum)

somatorio=0;
for i=1:length(dist_cum)
    somatorio=somatorio+((dist_cum(i)-w(i))^2);
end
QMEw=(somatorio)/length(dist_cum)

somatorio=0;
for i=1:length(dist_cum)
    somatorio=somatorio+((dist_cum(i)-n(i))^2);
end
QME n=(somatorio)/length(dist_cum)

somatorio=0;
for i=1:length(dist_cum)
    somatorio=somatorio+((dist_cum(i)-r(i))^2);
end
QME r=(somatorio)/length(dist_cum)

```

```

%% Teste Kolmogorov-Smirnoff
[h_LOG pv]=kstest2(dist_cum,L,0.05)
[h_WBL pv]=kstest2(dist_cum,w,0.05);
[h_NAK pv]=kstest2(dist_cum,n,0.05)
[h_RICE pv]=kstest2(dist_cum,r,0.05)

%% Calculo da Perda de Percurso
X=[ones(size(Distancia_km)) -log(Distancia_km)];
Prx=Potencia_Rx;
prx=find(Prx==--inf);
Prx(prx)=-70;
X_t=X';
X_t_X=X_t*X;
X_t_Y=X_t*Prx;
AS=[X_t_X(1,1) X_t_X(1,2) X_t_Y(1); X_t_X(2,1) X_t_X(2,2) X_t_Y(2)];
resul=rref(AS);
Prx_d_0_est=resul(1,3);
fator_n_prx=(resul(2,3)/10);%fator de atenuação em função da distância
intfn=round(fator_n_prx); %aproxima o fator de atenuação para colocar no titulo
fn=int2str(intfn);
Prx_est=Prx_d_0_est-10*fator_n_prx*log(Distancia_km);

figure(1)
plot(log(Distancia_km),Prx,'-b',log(Distancia_km),Prx_est,'-r','LineWidth',1);
xlabel('Distância em relação ao Tx [km] ', 'FontSize',
10,'FontWeight', 'bold')
ylabel('Nível de sinal [dBm]', 'FontSize', 10,'FontWeight', 'bold')
title('Reta de melhor ajuste para a perda com a Distância', 'FontSize', 10,'FontWeight', 'bold');
grid on

%% Cálculo do Desvanecimento em Larga Escala
Desv_lentol=Prx-Prx_est;
n=floor(metros./(Sinal_Recebido(end,4)/tam_SR(1)));

k=1;

for i=1:tam_SR(1)-n
    Desv_lento(k,1)=mean(Desv_lentol(i:i+n,1));
    k=k+1;
end
tam_Desv=size(Desv_lento);

figure(2)
plot(Distancia_km,Desv_lentol,'-b');
hold on
plot(Distancia_km(1:tam_Desv(1),1),Desv_lento,'k','LineWidth',2)
xlabel('Distância em relação ao Tx [km] ', 'FontSize',
10,'FontWeight', 'bold')
ylabel('Nível de sinal [dBm]', 'FontSize', 10,'FontWeight', 'bold')
title('Desvanecimento Lento', 'FontSize', 12,'FontWeight', 'bold');
legend('Potencia do sinal Recebido - Perda com Distância','Desvanecimento Lento','Location','NW')
grid on
figure (3)
plot(Distancia_km,Prx,'-b')
hold on

```

```

plot(Distancia_km,Prx_est,'r','LineWidth',2);
xlabel('Distância em relação ao Tx [km] ', 'FontSize',
10,'FontWeight', 'bold')
ylabel('Nível de sinal [dBm]', 'FontSize', 10,'FontWeight', 'bold')
title('Curva de Ajuste de Perda com a Distância', 'FontSize',
12,'FontWeight', 'bold');
legend('Desvanecimento Lento','Perda com a Distância','Loca-
tion','NW')
grid on
Desv_Rap=Desv_lento1(1:tam_Desv(1))-Desv_lento;
figure(4)

plot(Distancia_km(1:tam_Desv(1),1),Desv_Rap,'k')
xlabel('Distância em relação ao Tx [km] ', 'FontSize',
10,'FontWeight', 'bold')
ylabel('Nível de sinal [dBm]', 'FontSize', 10,'FontWeight', 'bold')
title('Desvanecimento Rápido', 'FontSize', 12,'FontWeight', 'bold');
legend('Desvanecimento Rápido','Location','NW')
grid on

%% Estatística de Larga Escala
% Calculo de PDF Empírica pelo histograma
%*****
Desv_lento=Desv_lento;
% Dados do histograma
[n,xout] = hist(Desv_lento,40)
delta_x=xout(2)-xout(1);
area_hist=delta_x.*n;
soma_area_hist=sum(area_hist);
area_pdf=area_hist/soma_area_hist;
n_pdf=area_pdf/delta_x;
% Desenha histograma
figure(5)
bar(xout,n_pdf,'c')
hold on;

%%
% Normal
param_Normal = mle(Desv_lento,'distribution','norm');
f = pdf('norm',xout,param_Normal(1),param_Normal(2));
plot(xout,f,'r','LineWidth',3), hold on

legend('FDP Empírica','LogNormal')%, 'Nakagami','Weibull','Ray-
leigh','Rice','Location','NorthEast');
xlabel('Potência do sinal [em dBm]', 'FontSize', 12)
ylabel('FDP', 'FontSize', 12)
title('Comparação dos Resultados Empíricos de Desvanecimento em
Larga Escala com as Principais Funções de Densidade de Probabilida-
des', 'FontSize', 14,'FontWeight', 'bold');
clc

%Teste QUI quadrado
bins=0:(length(xout)-1);
[hf,probf,stf] = chi2gof(bins,'ctrs',bins,'frequency',n_pdf,'expec-
ted',f,'emin',0,'nparams',1);

%% Estatística de Pequena Escala

% Cálculo do Desv Rápido
% *****
Desv_Rap=Desv_lento1(1:tam_Desv(1))-Desv_lento;

```

```

figure(6)
plot(Distancia_km(1:tam_Desv(1),1),Desv_Rap,'k')
grid on

% Calculo de PDF Empírica pelo histograma
%*****
potenciay = 0.001*(10.^(Desv_Rap./10)); %Passa a potência de dBm
para W
Desv_Rap = sqrt(potenciay.*100); %Tensão em volts

% Dados do histograma
[n,xout] = hist(Desv_Rap,50);
delta_x=xout(2)-xout(1);
area_hist=delta_x.*n;
soma_area_hist=sum(area_hist);
area_pdf=area_hist/soma_area_hist;
n_pdf=area_pdf/delta_x;
% Desenha histograma
figure(7)
bar(xout,n_pdf,'c')
hold on;
%*****
% Normal
clear f
% Nakagami
param_Nakagami = mle(Desv_Rap,'distribution','nakagami');
n = pdf('nakagami',xout,param_Nakagami(1),param_Nakagami(2));
plot(xout,n,'g','LineWidth',2)
% Weibull
param_Weibull = mle(Desv_Rap,'distribution','wbl');
w = pdf('wbl',xout,param_Weibull(1),param_Weibull(2));
plot(xout,w,'r','LineWidth',2)
% Rayleigh
param_Rayleigh = mle(Desv_Rap,'distribution','rayl');
ry = pdf('rayl',xout,param_Rayleigh(1));
plot(xout,ry,'b','LineWidth',2)
% Rice
param_Rice = mle(Desv_Rap,'distribution','rician');
r = pdf('rician',xout,param_Rice(1),param_Rice(2));
plot(xout,r,'--y','LineWidth',2)

legend('FDP Empírica','Nakagami','Weibull','Rayleigh','Rice','Loca-
tion','NorthEast');
xlabel('Tensão do Sinal [em V]', 'FontSize', 12)
ylabel('FDP', 'FontSize', 12)
title('Funções de Densidade de Probabilidade Prática e Teórica para
o Desvanecimento Rápido - Trecho 1', 'FontSize', 14,'FontWeight',
'bold');
%% Calculo dos Desvios

somatorio=0;
for i=1:length(n_pdf)
    somatorio=somatorio+abs(n_pdf(i)-ry(i));
end
desviory=(somatorio)/length(n_pdf)

somatorio=0;
for i=1:length(n_pdf)
    somatorio=somatorio+abs(n_pdf(i)-r(i));
end
desvior=(somatorio)/length(n_pdf)

```

```
somatorio=0;
for i=1:length(n_pdf)
    somatorio=somatorio+abs(n_pdf(i)-n(i));
end
desvion=(somatorio)/length(n_pdf)

somatorio=0;
for i=1:length(n_pdf)
    somatorio=somatorio+abs(n_pdf(i)-w(i));
end
desviow=(somatorio)/length(n_pdf)
%% Calculo dos erros médio quadrático

somatorio=0;
for i=1:length(n_pdf)
    somatorio=somatorio+((n_pdf(i)-ry(i))^2);
end
QMEry=(somatorio)/length(n_pdf)

somatorio=0;
for i=1:length(n_pdf)
    somatorio=somatorio+((n_pdf(i)-r(i))^2);
end
QMEr=(somatorio)/length(n_pdf)

somatorio=0;
for i=1:length(n_pdf)
    somatorio=somatorio+((n_pdf(i)-n(i))^2);
end
QMEn=(somatorio)/length(n_pdf)

somatorio=0;
```

ANEXO B – Datasheets de Equipamentos


BROADBAND LOW NOISE AMPLIFIER
ABL0800-12-3315

Features:

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

Electrical Specifications

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

Product Specifications

MOBILE MARK
COMMUNICATION ANTENNAS



RM-WLF Series



MMF3-700 series



MGRM-WLF Series



Direct N Jack (Female)

700 MHz Surface, Mag-mount & Glass Mount

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

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

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

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

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

| Specifications | | Case Material: | |
|---------------------|--------------------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| Frequency: | See above | RM, MGRM: ASA; MM3: ABS | |
| Gain: | 3 dBi peak gain | RM Stud Depth: | Mount to 1/2" metal (12.7 mm) |
| VSWR: | 2:1 max over range | Operating Temp: | -40° to +85° C |
| Nominal Impedance: | 50 ohms | Hardware Supplied: | |
| Maximum Power: | | RM Stud Mount | Locknut and gasket |
| RM & MGRM | 35 Watts | MMF Glass Mount | 3M VHB tape |
| MMF | 10 watts | Cable: | |
| Antenna Size/Mount: | | RM-WLF-1C | 1 ft RG-58 (305 mm) |
| RM Series | 1.75"D x 3"H, 5/8" hole required (45 mm x 76 mm, 16 mm hole) | MGRM Mag | 10 ft RG-58 (3 meters) |
| RM-WLF-DN | 1.75"D x 3"H x .63" hole (45 mm x 76 mm, 16 mm hole) | MMF3-700 | 15ft RG-58 (4.5 meters) |
| MGRM Mag | 2.65" base diameter x 3.62" high (67 mm x 92 mm) | Standard Connector: | SMA Plug (Male) |
| MMF3-700 | 2" dia. Mount, 3.75"L Whips (51 mm dia, 95 mm) | DN Connector: | Direct N Jack (Female) |
| | | Shock & Vibration: | |
| | | RM & MGRM | EN 61373, IEEE 1478, MIL 810G |
| | | | TIA-329.2-C |
| | | Dust/Water Ingress: | RM:IP67, MGRM:IPx5 |

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