TRABALHO DE GRADUAÇÃO

MODELAGEM ESTATÍSTICA DE CANAIS SEM FIO EM DESVANECIMENTO COMPOSTO NAS FAIXAS DE 700 MHz E 2500 MHz

Pedro Carlos Batista Bretas Júnior

Sérgio Pinho Piretti

Brasília, novembro de 2012

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASILIA
Faculdade de Tecnologia

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

MODELAGEM ESTATÍSTICA DE CANAIS SEM FIO EM DESVANECIMENTO COMPOSTO NAS FAIXAS DE 700 MHz E 2500 MHz

Pedro Carlos Batista Bretas Júnior

Sérgio Pinho Piretti

Relatório submetido ao Departamento de Engenharia Elétrica como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro de Redes de Comunicação

Banca Examinadora

Prof. Ugo Silva Dias, ENE/UnB _____
Orientador

Prof. André Noll Barreto, ENE/UnB _____
Examinador Interno

Prof. Adoniran Judson de Barros Braga, ENE/UnB _____
Examinador Interno

Dedicatórias

Ao Michael.

Sérgio Pinho Piretti

A quem se interessar pelo assunto.

Pedro Carlos Batista Bretas Júnior

Agradecimentos

Ao companheirismo do Pirettão, à sabedoria do Professor Ugo e às ajudas incondicionais do João, Diogo, Fábio, Danilão e Cleyson. Muito obrigado.

Pedro Carlos Batista Bretas Júnior

Às pessoas que contribuiram na construção deste projeto, em especial ao Professor Ugo Dias e aos amigos Pedro Bretas, Diogo Lisita, Pablo Estrela, Fábio von Glehn, Danilo Filgueira e João Paulo Leite. À minha família pela apoio e carinho diário.

Sérgio Pinho Piretti

RESUMO

Este trabalho propõe e realiza uma investigação prática da função densidade de probabilidade, obtida em formula fechada, para a distribuição composta α-μ/Gamma para canais em desvanecimento composto em ambientes sem fio. A caracterização estatística contempla tanto a obtenção de modelos teóricos quanto a investigações práticas através de campanhas de medições de campo. Mais especificamente, a análise é realizada para os canais rádio-móvel operando nas frequências de 780 MHz e 2500 MHz no campus da UnB. Um sistema transmissor e outro receptor foram especialmente configurados para realização das campanhas de medição e um software para o processamento dos dados adquiridos em campo foi desenvolvido. Os dados práticos são confrontados com os dados teóricos tanto para distribuições compostas já apresentadas na literatura como para a α-μ/Gamma e um bom ajuste entre eles é encontrado.

Palavras-Chaves: Desvanecimento Composto, Caracterização Estatística, Medições de Campo

ABSTRACT

This work proposes and conduct a pratical investigation on the a probability density function, obtained in closed-form expression, for the α-μ/Gamma composite distribution for the multipath-shadowed fading channel in wireless environments. The statistical characterization includes both theorical models and pratical investigations through field measurements. More specifically, the analyses was realized for the mobile radio channel operating in the frequencies 780 MHz and 2500 MHz at the University of Brasilia campus. A transmission and reception system was specially designed for filed measurements and a software for processing the captured data was built. The pratical data are confronted with the theorical data both for the composites distributions found in the literature and the α-μ/Gamma and good fits are founded.

Keywords: Composite Fading, Channel Characterization, Field Measurements.

SUMÁRIO

1 Introdução **1**
1.1 Canal Rádio-Móvel 1
1.2 Proposta do Trabalho 3
1.3 Estrutura do Trabalho 4

2 Processos de Desvanecimentos de Longo e de Curto Prazos **5**
2.1 Perda de Percurso 5
2.1.1 Modelo Log-Distância 6
2.2 Sombreamento 6
2.2.1 Distribuição Lognormal 8
2.2.2 Distribuição Gamma 8
2.3 Desvanecimento de Curto Prazo 9
2.3.1 Distribuição de Rayleigh 10
2.3.2 Distribuição de Rice 10
2.3.3 Distribuição de Nakagami-m 11
2.3.4 Distribuição κ-μ 12
2.3.5 Distribuição α-μ 13
2.4 Conclusão 14

3 Desvanecimento Composto **15**
3.1 Processo de Composição 15
3.2 Distribuição α-μ/Gamma 16
3.3 Distribuição Nakagami-m/Gamma 18
3.4 Distribuição Rayleigh/Gamma 18

4 Sistema de Medição **19**
4.1 Sistema de Transmissão e Recepção 19
4.1.1 Gerador de Onda Contínua 21
4.1.2 Antena 22
4.1.3 Amplificador de Baixo Ruído (LNA) 22
4.1.4 Analisador de Espectro 23
4.1.5 Conversor Analógico/Digital 23
4.2 Cenários de Medições 26

4.2.1 Cenário 1 27
4.2.2 Cenário 2 28
4.2.3 Cenário 3 29
4.2.4 Cenário 4 30
4.3 Conclusão 30

5 Caracterização Estatística de Canais Sem Fio em Desvanecimento Composto 31
5.1 Processamento de dados 31
5.2 Resultados Obtidos 32
5.2.1 Fundo_SG11 33
5.2.2 Frente_SG11 35
5.2.3 L3 37
5.2.4 Frente_FE 39
5.3 Erros das PDFs 41
5.4 Conclusão 41

6 Conclusões 42
6.1 Considerações Finais 42
6.2 Trabalhos Futuros 42

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 44

LISTA DE FIGURAS

1.1 Arquitetura de um sistema de comunicação genérico [3]. 2
1.2 Contribuições do ruído no canal sem fio [3]. 2
1.3 As três escalas de variação de sinal [3]. 3

2.1 Variação dos perfis de caminhos para uma determinada distância da estação base [3]. 7
2.2 Típica variação do sombreamento [3]. 7
2.3 Propagação multipercurso sem linha de visada [3]. 9
2.4 Propagação multipercurso com linha de visada [3]. 10

3.1 Várias curvas da PDF α-μ/Gamma para $\mu = 4/7$ e $m_s = 3$. 17
3.2 Várias curvas da PDF α-μ/Gamma para $\alpha = 7/4$ e $m_s = 3$. 17
3.3 Várias curvas da PDF α-μ/Gamma para $\alpha = 2,5$ e $\mu = 1,5$. 17

4.1 Sistema de transmissão 20
4.2 Sistema de recepção 20
4.3 Diagrama do sistema de medição 21
4.4 Gerador de onda contínua 21
4.5 Antenas e cabos 22
4.6 Amplificador de baixo ruído 23
4.7 Analisador de espectro 24
4.8 Conversor analógico/digital 24
4.9 Interface do aplicativo LJstream 25
4.10 Interface de configuração do canal no aplicativo LJstream 25
4.11 Caminhos percorridos nas campanhas de medições 26
4.12 Caminho percorrido ao fundo do prédio SG11. 27
4.13 Caminho percorrido em frente do prédio SG11. 28
4.14 Caminho percorrido em frente do prédio da FE. 29
4.15 Caminho percorrido na avenida L3. 30

5.1 Aquisição de potência *versus* distância em 780 MHz no cenário Fundo_SG11. 33
5.2 Aquisição de potência *versus* distância em 2500 MHz no cenário Fundo_SG11. 33
5.3 Comparação das PDFs teóricas e PDF adquirida para desvanecimento composto em 780 MHz no cenário Fundo_SG11. 34
5.4 Comparação das PDFs teóricas e PDF adquirida para desvanecimento composto em 2500 MHz no cenário Fundo_SG11. 34

5.5 Aquisição de potência *versus* distância em 780 MHz no cenário Frente_SG11. 35
5.6 Aquisição de potência *versus* distância em 2500 MHz no cenário Frente_SG11. 35
5.7 Comparação das PDFs teóricas e PDF adquirida para desvanecimento composto em 780 MHz no cenário Frente_SG11. 36
5.8 Comparação das PDFs teóricas e PDF adquirida para desvanecimento composto em 2500 MHz no cenário Frente_SG11. 36
5.9 Aquisição de potência *versus* distância em 780 MHz no cenário L3. 37
5.10 Aquisição de potência *versus* distância em 2500 MHz no cenário L3. 37
5.11 Comparação das PDFs teóricas e PDF adquirida para desvanecimento composto em 780 MHz no cenário L3. 38
5.12 Comparação das PDFs teóricas e PDF adquirida para desvanecimento composto em 2500 MHz no cenário L3. 38
5.13 Aquisição de potência *versus* distância em 780 MHz no cenário Frente_FE. 39
5.14 Aquisição de potência *versus* distância em 2500 MHz no cenário Frente_FE. 39
5.15 Comparação das PDFs teóricas e PDF adquirida para desvanecimento composto em 780 MHz no cenário Frente_FE. 40
5.16 Comparação das PDFs teóricas e PDF adquirida para desvanecimento composto em 2500 MHz no cenário Frente_FE. 40

LISTA DE TABELAS

5.1 Parâmetros calculados para o cenário Fundo_SG11. 33
5.2 Parâmetros calculados para o cenário Frente_SG11. 35
5.3 Parâmetros calculados para o cenário L3. 37
5.4 Parâmetros calculados para o cenário Frente_FE. 39
5.5 Erros das PDFs. 41

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

C	Constante que depende das características das antenas e da média de atenuação do canal
d	Distância
d_0	Distância de campo próximo
$E[\cdot]$	Esperança
f_{dist}	PDF da distribuição *dist*
f_{emp}	PDF empírica calculada com dados práticos
$I_n[\cdot]$	Função de Bessel de primeiro tipo e n-ésima ordem
K	Razão entre a potência da componente dominante pela potência total das componentes de multipercurso
$K_n[\cdot]$	Função de Bessel de segundo tipo e n-ésima ordem
m	Número de componentes que formam o sinal. Parâmetro inversamente proporcional à severidade do desvanecimento de curto prazo
m_s	Parâmetro inversamente proporcional à severidade do sombreamento
P_A	Potência média de área
P_r	Potência de recepção
P_t	Potência de transmissão
r	Variável aleatória do desvanecimento de curto prazo que refere-se à envoltória do sinal
r_c	Variável aleatória do desvanecimento composto que refere-se à envoltória do sinal composto
$\hat{r}$	Raiz quadrada da potência média ou valor *rms* da envoltória. Para a distribuição α-μ, significa a raiz α-ésima da envoltória média elevada a α
$V[\cdot]$	Variância
y	Variável aleatória do desvanecimento de longo prazo que refere-se à potência média local

Símbolos Gregos

α	Parâmetro de potência
$\alpha_{R/G}$	Parâmetro de forma
β	Inverso do parâmetro de escala
γ	Expoente de perda de percurso
$\Gamma[\cdot]$	Função Gamma
ε	Erro médio entre as curvas empíricas e teóricas
κ	Razão entre a potência da componente dominante pela potência total das componentes de multipercurso
λ	Comprimento de onda
μ	Número de componentes que formam o sinal. Parâmetro inversamente proporcional à severidade do desvanecimento de curto prazo
ξ	Inverso do parâmetro m
ρ	Variável aleatória do desvanecimento de curto prazo que refere-se à envoltória normalizada
ρ_c	Variável aleatória do desvanecimento composto que refere-se à envoltória do sinal composto normalizada
ρ_s	Variável aleatória do sombreamento que refere-se à potência média local normalizada
σ	Desvio padrão
Ω	Potência média local
Ω_s	Potência média de área do sombreamento Gamma

Siglas

AC	Corrente Alternada (do inglês, *Alternating Current*)
A/D	Analógico/Digital
dB	Decibel
dBi	Ganho em decibel com relação a isotropia
dBm	Ganho em decibel com relação a 1 miliwatt
DC	Corrente Contínua (do inglês, *Direct Current*)
EIRP	Potência Isotrópica Efetivamente Radiada (do inglês, *Effective Isotropically Radiated Power*)
Frente_FE	Cenário de aquisição de dados à frente do prédio da Faculdade de Educação
Frente_SG11	Cenário de aquisição de dados à frente do prédio SG11
Fundo_SG11	Cenário de aquisição de dados ao fundo do prédio SG11

L3	Cenário de aquisição de dados ao longo da avenida L3
LNA	Amplificador de Baixo Ruído (do inglês, *Low Noise Amplifier*)
LOS	Linha de Visada (do inglês, *Line Of Sight*)
NLOS	Sem Linha de Visada (do inglês, *Non Line Of Sight*)
PDF	Função Densidade de Probabilidade (do inglês, *Probability Density Function*)
SG11	Prédio de laboratório da Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília
UHF	Frequência Ultra Alta (do inglês, *Ultra High Frequency*)
UnB	Universidade de Brasília
USB	Barramento Serial Universal (do inglês, *Universal Serial Bus*)

Capítulo 1

Introdução

A comunicação sem fio é o segmento de crescimento mais acelerado dentro do ramo das comunicações [1]. O seu uso cada vez mais frequente é consequência não apenas da sua mobilidade, mas também pelo fato de exigir menores modificações no meio em que atua. Os novos serviços oferecidos pelas empresas de telecomunicações e a grande diversidade de aplicações criadas para dispositivos móveis tem exigido sistemas mais robustos, com altas taxas de transmissão, maior disponibilidade e confiabilidade. A robustez desejada para esses sistemas requer um avanço tecnológico frequente, porém tal avanço apresenta grandes desafios.

O desempenho dos sistemas sem fio é duramente penalizado pela natureza estocástica do canal rádio-móvel. Como resultado, a amplitude e a fase do sinal que chegam ao receptor apresentam flutuações aleatórias, caracterizando os fenômenos de desvanecimento. Tais flutuações deterioram o desempenho da comunicação, mas diversos mecanismos podem ser utilizados para combater seus efeitos deletérios como, por exemplo, técnicas de diversidade, codificação, equalização e outros. Para a correta aplicação destas técnicas, uma caracterização adequada do canal em desvanecimento - modelagem, análise e experiências com medições de campo - é indispensável e, portanto, de grande importância no projeto de sistemas de comunicação sem fio [2].

1.1 Canal Rádio-Móvel

Em sistemas de comunicação sem fio, as fontes de ruídos podem ser subdivididas em aditivas e multiplicativas, conforme ilustrado na Figura 1.1. Os ruídos aditivos são gerados a partir do próprio receptor, como ruídos térmicos ou de descarga dos componentes ativos e passivos, bem como de ruídos externos como efeitos atmosféricos, radiações cósmicas ou interferência de outros transmissores e dispositivos elétricos. Já os ruídos multiplicativos advêm de vários processos encontrados pelo caminho de propagação das ondas transmitidas. Alguns deles são:

- As características direcionais das antenas transmissoras e receptoras;
- A reflexão (de superfícies lisas de paredes e colinas);

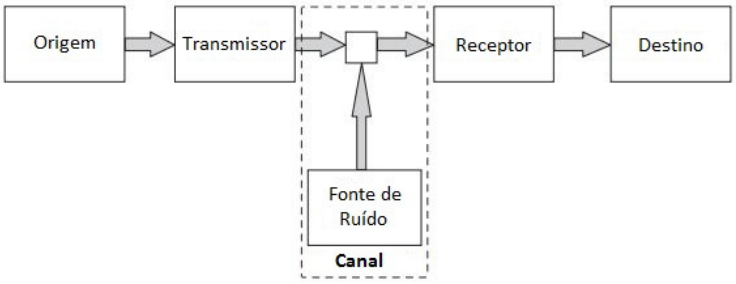

Figura 1.1: Arquitetura de um sistema de comunicação genérico [3].

- A absorção (por paredes, árvores e pela atmosfera);
- O espalhamento (de superfícies ásperas como o mar, terrenos acidentados e folhas e galhos das árvores);
- A difração (de bordas como telhados e topos de colinas);
- A refração (devido às camadas atmosféricas e alguns materiais).

É conveniente subdividir ainda os ruídos multiplicativos do canal em três tipos de desvanecimentos: a perda de percurso, o sombreamento (ou desvanecimento de longo prazo) e o desvanecimento de curto prazo (multipercurso), como mostra a Figura 1.2. O desvanecimento é basicamente um fenômeno espacial que é experimentado, contudo, como uma variação temporal pelo receptor que se move através de um campo de multipercurso [3].

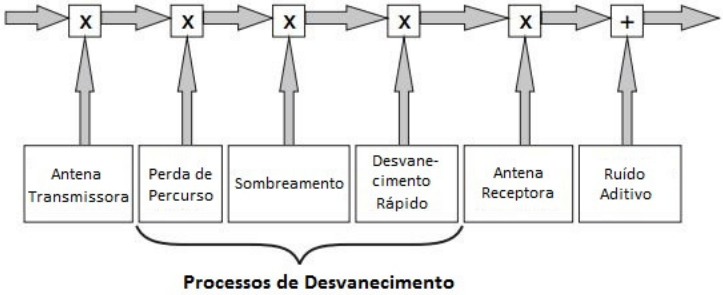

Figura 1.2: Contribuições do ruído no canal sem fio [3].

Um exemplo dos três processos de desvanecimento é ilustrado na Figura 1.3, que mostra uma simulação de um sinal recebido por um receptor móvel afastando-se do transmissor.

A perda de percurso leva a uma diminuição da força do sinal recebido à medida que a distância entre o transmissor e o receptor aumenta. Um sistema típico pode ter variações da ordem de 150 dB sobre sua área de cobertura devido a perda de percurso [4].

Aliado à perda de percurso, o desvanecimento de curto prazo também conta com o efeito do sombreamento, devido às obstruções naturalmente impostas entre o transmissor e o receptor à medida que o móvel se desloca. Na realidade, o termo sombreamento surgiu devido ao deslocamento

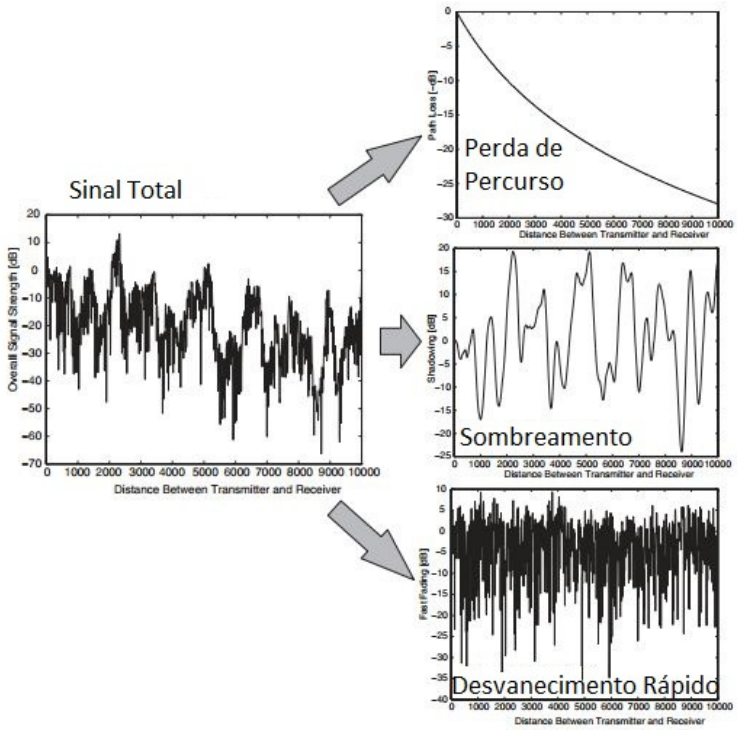

Figura 1.3: As três escalas de variação de sinal [3].

do móvel ser normalmente dentro das sombras de colinas e edifícios [3]. No geral, as variações do sinal devido ao sombreamento podem chegar até 20 dB [4].

O desvanecimento de curto prazo por sua vez, é percebido após deslocamentos da ordem de meio comprimento de onda (centímetros, para a faixa UHF). As variações neste caso são resultados de interferências construtivas e destrutivas entre as múltiplas ondas que percorrem caminhos diferentes entre o transmissor e o receptor. Frequentemente, estas variações chegam a ter até 40 dB [4].

1.2 Proposta do Trabalho

A proposta deste trabalho é obter, investigar e analisar com dados práticos as distribuições para canais que sofrem com o desvanecimento composto por multipercurso e sombreamento. Na literatura são encontrados diversos estudos sobre a modelagem do canal sem fio a partir do desvanecimento de multipercurso e do sombreamento separadamente. Os poucos documentos que tratam dos dois fenômenos de desvanecimento juntos, utilizam na composição das distribuições, modelos estatísticos de desvanecimento de curto prazo com até um grau de liberdade, como a distribuição de Rayleigh ou Nakagami-m. A quantidade de trabalhos é ainda mais reduzida quando trata-se da investigação prática dessas distribuições compostas com dados práticos. Observando estas deficiências, este trabalho propõe a obtenção uma nova distribuição composta em fórmula fechada para modelar o desvanecimento composto utilizando a distribuição α-μ, visto que esta possui dois parâmetros para caracterizar o desvanecimento de multipercurso. O trabalho apresenta ainda investigações práticas para a distribuição α-μ/Gamma e para as distribuições formuladas em outros

estudos, Nakagami-m/Gamma e Rayleigh/Gamma.

Visando a investigação prática, um sistema de campo foi utilizado e configurado especialmente para esse fim. Várias campanhas de medições foram realizadas ao redor do prédio de laboratórios da Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília, o SG11. Após a coleta de campo, os dados são processados e os resultados são analisados.

As principais contribuições deste trabalho, portanto, são:

- Propor um modelo teórico com fórmula fechada para caracterização do desvanecimento composto pelo multipercurso e pelo sombreamento utilizando as distribuições α-μ e Gamma;
- Investigar na prática, por meio de medições de campo, as distribuições Rayleigh/Gamma, Nakagami-m/Gamma e a α-μ/Gamma.

1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está estruturado da seguinte forma:

- **Capítulo 2** - Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica descrevendo cada um dos três processos de desvanecimento que agem sobre o sinal propagado: a perda de percurso, o desvanecimento de longo prazo e o desvanecimento de curto prazo. Para caracterizar o primeiro, é utilizado um modelo simples de log-distância; para o segundo, a distribuição Gamma é apresentada como uma aproximação à distribuição Lognormal; e, por fim, para descrever o desvanecimento de curto prazo são apresentadas as distribuições de Rayleigh, Rice, Nakagami-m, κ-μ e α-μ;
- **Capítulo 3** - Neste capítulo é apresentada o processo matemático de composição entre duas distribuições estatísticas. Em seguida este processo é aplicado às distribuições α-μ e Gamma, obtendo a função densidade probabilidade α-μ/Gamma; são apresentadas também as PDFs Nakagami-m/Gamma e Rayleigh/Gamma que são casos particulares da distribuição anterior;
- **Capítulo 4** - Neste capítulo é apresentada e descrito o sistema de medição utilizado e os cenários percorridos durante a aquisição dos dados de campo;
- **Capítulo 5** - Neste capítulo é feita a análise de alguns dos cenários medidos e a comparação entre as PDFs empíricas e teóricas dos desvanecimentos compostos;
- **Capítulo 6** - São apresentadas neste capítulo, as conclusões finais e propostas para futuros trabalhos.

Capítulo 2

Processos de Desvanecimentos de Longo e de Curto Prazos

Os processos de desvanecimento são divididos em três tipos: perda de percurso, desvanecimento de longo prazo e desvanecimento de curto prazo. Neste capítulo, será feito uma revisão bibliográfica de cada um destes processos.

2.1 Perda de Percurso

A perda de percurso (do inglês, *path loss*) é causada tanto pela dissipação da potência radiada pelo transmissor como por efeitos de propagação do canal. Na literatura, diversos são os modelos que descrevem essa perda de percurso e são dividos entre aqueles que apresentam a perda do sinal para enlaces ponto a ponto e aqueles que apresentam uma predição para enlaces de ponto multiponto ou ponto área.

Para o primeiro caso, os modelos mais conhecidos estudam o traçamento de raios (do inglês, *ray tracing*) entre o transmissor e o receptor e, apesar de necessitarem de um conhecimento mais preciso sobre o perfil topológico do local, oferecem uma predição de sinal bem próxima do real. Para os enlaces ponto multiponto ou ponto área, que é o caso das redes celulares, estes modelos tornam-se, contudo, bastante trabalhosos e são substituidos por modelos mais genéricos que fornecem a predição de uma potência média de área.

Geralmente, os modelos de perda de percurso para ponto multiponto ou ponto área são baseados em medições empíricas que levam em consideração sobretudo uma determinada área geográfica, uma faixa de frequência específica e as alturas das antenas das estações transmissoras e receptoras. Alguns exemplos destes modelos são, entre outros, o de Okumura, Hata e COST 231, e seus resultados serão tão mais próximos dos resultados obtidos em campo, quanto mais as características do ambiente se assemelharem aos locais utilizados para a síntese do próprio modelo.

Neste trabalho, contudo, foi utilizado um modelo simplificado para caracterizar a perda de percurso. Este modelo, denominado de log-distância, trata-se de uma formulação que captura

a essência da propagação do sinal sem recorrer a cálculos analíticos complexos dependentes de inúmeras variáveis.

2.1.1 Modelo Log-Distância

O modelo log-distância é um modelo simples que descreve a perda de percurso baseada na distância entre o transmissor e o receptor e em características das antenas utilizadas e do meio de propagação. Sua expressão é descrita da forma

$$P_r = P_t C \left(\frac{d_0}{d}\right)^{\gamma}, \tag{2.1}$$

em que C é uma constante que depende das características das antenas e da média de atenuação do canal, d_0 é a distância de campo próximo, e γ é o expoente de perda de percurso.

Descrita em decibéis, a expressão fica da forma

$$P_{r[dBm]} = P_{t[dBm]} + C_{[dB]} - 10\gamma \log_{10}\left(\frac{d_0}{d}\right). \tag{2.2}$$

Devido ao espalhamento causado quando a antena receptora está dentro do campo próximo, o modelo apresentado é geralmente válido para transmissões em que $d > d_0$, em que d_0 assume o valor de 1 a 10 metros em ambientes indoor e 10 a 100 metros em ambientes outdoor. Expoentes de perda de percurso tendem a ser maiores em altas frequências, entretanto tendem a ser menores para alturas maiores da antena transmissora [1].

Neste trabalho, como será visto no Capítulo 5, o uso do modelo log-distância é feito durante o processamento dos dados capturados em campo onde, a partir destes dados, é calculado uma regressão não linear para gerar uma expressão do tipo $a + b * log_{10}(d)$. Esta expressão representará a perda de percurso sofrida pelo sinal ao longo das aquisições realizadas.

2.2 Sombreamento

Como pôde ser visto na Seção 2.1, o sinal recebido pela perda de percurso é descrito de maneira determinística. Isto é, uma vez informado a distância entre a estação base e o receptor móvel fica fácil de predizer qual a intensidade do sinal que será recebido. Na prática, contudo, como ilustrado na Figura 2.1, as características do ambiente para uma determinada distância são diferentes para cada percurso percorrido pelo sinal, o que causa variações em relação ao valor nominal da potência recebida dado pelos modelos de perda de percurso. A este fenômeno, é dado o nome de sombreamento.

Para prever com confiabilidade a cobertura de qualquer sistema celular móvel, é fundamental que o sombreamento seja levado em consideração. Para o processo de *handover*, por exemplo, a margem de intensidade de sinal conhecida como histerese para fazer a troca de célula é determinada

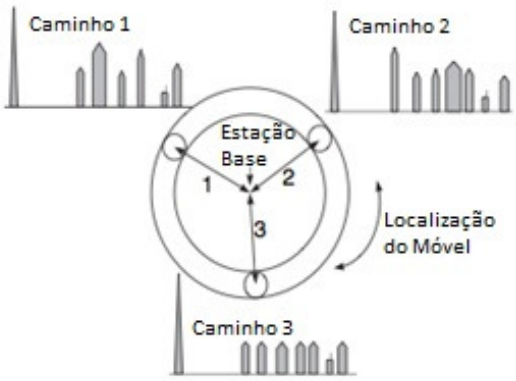

Figura 2.1: Variação dos perfis de caminhos para uma determinada distância da estação base [3].

pelo estudo de sombreamento no sistema, já que isto determina a variação da intensidade do sinal ao longo da borda da célula [4].

Devido ao bloqueio causado pelos objetos presentes ao longo do caminho percorrido, o sinal transmitido passará por variações aleatórias. Tais variações são causadas pelas mudanças das superfícies refletoras e dos objetos que causam o espalhamento do sinal. A Figura 2.2 exibe uma variação típica causada pelo sombreamento.

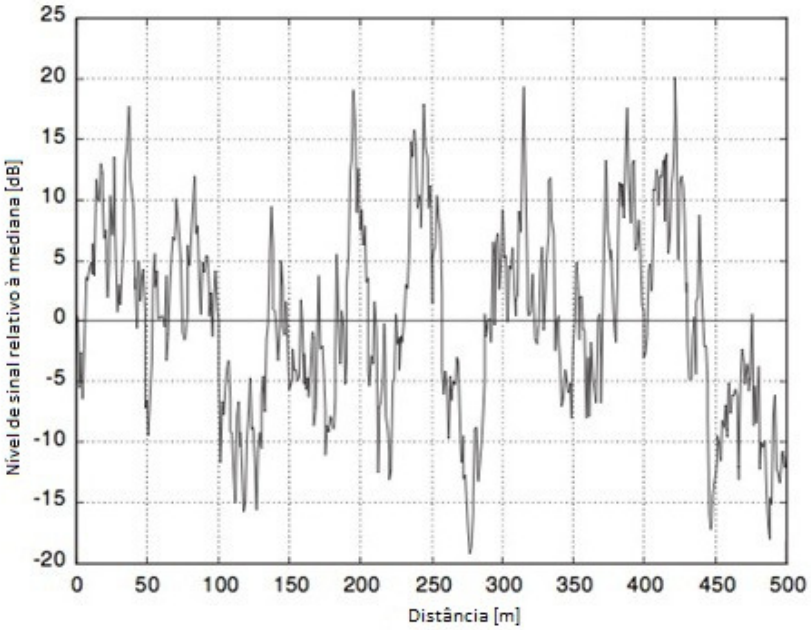

Figura 2.2: Típica variação do sombreamento [3].

Desta forma, como a localização, tamanho e propriedades dielétricas dos objetos que bloqueiam o sinal, assim como as mudanças das superfícies refletoras e dos objetos que o espalham são geralmente desconhecidas, um modelo estatístico se faz necessário para caracterizar a recepção do sinal. O modelo mais utilizado para descrever o sombreamento tem sido o Lognormal, já que este modelo tem confirmado empiricamente com precisão a variação da potência recebida tanto em

ambientes internos como em ambientes externos [1]. Sua distribuição descreve o que é chamado de potência média local.

Enquanto os efeitos de larga escala determinam um nível de potência média sobre uma área de dezenas a centenas de metros, chamada de potência média de área, o sombreamento introduz flutuações adicionais de modo que a potência média local recebida varie em torno da potência média de área. O termo "média local" é usado para descrever o nível médio de sinal sobre dezenas de comprimentos de onda. Uma quantidade geralmente utilizada para avaliar essa média local é de 40 λ. Este valor assegura que as flutuações rápidas da potência recebida causadas pelos efeitos de multipercurso sejam em grande parte suprimidas [5].

2.2.1 Distribuição Lognormal

De acordo com [6], estudos empíricos mostram que a potência de média local Ω do sombreamento tem a PDF Lognormal

$$p_\Omega(y) = \frac{1}{y\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{ln^2(y/P_A)}{2\sigma^2}\right], y > 0, \tag{2.3}$$

em que P_A é a potência média de área e σ é o desvio padrão do sombreamento.

Descrevendo-a de forma normalizada, em que $\rho_s = y/P_A$, a expressão fica da forma

$$p_P(\rho_s) = \frac{1}{\rho_s\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{ln^2\rho_s}{2\sigma^2}\right], \rho_s > 0. \tag{2.4}$$

Apesar da distribuição Lognormal ser amplamente aceita para descrever o sombreamento, combiná-la com as distribuições que modelam o multipercurso resulta em fórmulas abertas difíceis de se usar em cálculos como taxa de erro de bit, esquemas de diversidade, probabilidade de *outage*, predição de cobertura, etc [7].

2.2.2 Distribuição Gamma

Em [6] e [7], a distribuição Gamma foi proposta como uma aproximação à distribuição Lognormal. Em [7], a PDF da distribuição Gamma é descrita da forma

$$p_\Omega(y) = \frac{1}{\Gamma[m_s]} \left(\frac{m_s}{\Omega_s}\right)^{m_s} y^{m_s-1} \exp\left[-y\frac{m_s}{\Omega_s}\right], \tag{2.5}$$

em que $\Gamma[\cdot]$ é a função Gamma.

O parâmetro m_s descreve inversamente a severidade do sombreamento e o parâmetro Ω_s descreve a potência média de área do sombreamento Gamma. Vale observar que o parâmetro m_s é descrito desta forma (em que a letra s refere-se ao sombreamento) para fazer alusão ao m da distribuição de desvanecimento de multipercurso de Nakagami-m, visto que o parâmetro desta distribuição também compartilha do mesmo significado.

Para estimar os valores dos parâmetros m_s e Ω_s, temos as seguinte expressões, em que $E[\cdot]$ é a esperança e $V[\cdot]$ é a variância,

$$m_s = \frac{E[y]^2}{V[y]}, \tag{2.6}$$

$$\Omega_s = E[y]. \tag{2.7}$$

Normalizando a expressão Gamma em função de ρ_s, onde $\rho_s = y/\Omega_s$. A PDF fica, então, da forma

$$p_P(\rho_s) = \frac{{m_s}^{m_s}}{\Gamma[m_s]} {\rho_s}^{m_s-1} \exp[-\rho_s m_s]. \tag{2.8}$$

2.3 Desvanecimento de Curto Prazo

Quando o transmissor e o receptor estão rodeados de objetos que refletem e espalham a energia transmitida, o receptor recebe ondas a partir de diversos caminhos diferentes. Esta propagação é chamada de multipercurso. Existem dois tipos de ambientes de multipercurso: aqueles onde o caminho direto entre o transmissor e o receptor encontra-se bloqueado (situação dita *NLOS - Non Line of Sight*), de forma que o sinal recebido é oriundo das componentes de multipercurso, e aqueles onde há a linha de visada (*LOS - Line of Sight*), de forma que o receptor experimenta um sinal dominante e vários outros sinais de menor intensidade vindos dos múltiplos percursos. As Figuras 2.3 e 2.4 ilustram estas duas situações.

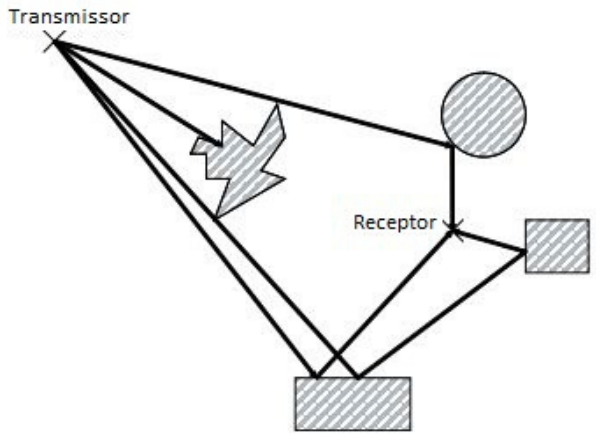

Figura 2.3: Propagação multipercurso sem linha de visada [3].

Quando temos um ambiente de multipercursos, cada uma das ondas recebidas pelo receptor pode possuir uma fase diferente e independente das outras ondas, de forma que se pode associar a isto uma distribuição uniforme com igual probabilidade das fases terem qualquer valor.

Assim como no sombreamento, nenhuma tentativa é feita para predizer o valor exato da intensidade do sinal recebida do desvanecimento de multipercursos, visto que isto requer o conhecimento

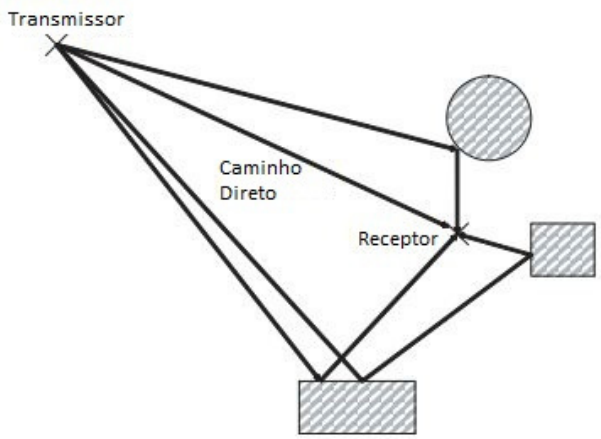

Figura 2.4: Propagação multipercurso com linha de visada [3].

exato das posições e características eletromagnéticas de cada onda recebida. Desta forma, a predição feita para este caso também utiliza-se de métodos estatísticos, porém desta vez considera-se se a linha de visada está presente ou não.

Na literatura, existem diversas funções que descrevem o desvanecimento de curto prazo, sendo que, a seguir, serão descritas as mais utilizadas.

2.3.1 Distribuição de Rayleigh

Com resultados que aproximam-se dos casos onde não há a linha de visada, a distribuição de Rayleigh tem sua PDF descrita da forma

$$p_R(r) = \frac{2r}{\Omega} \exp\left[-\frac{r^2}{\Omega}\right], \tag{2.9}$$

em que r representa a envoltória e Ω, a potência média do sinal recebido.

Sabendo que a potência média do sinal é dada por $\Omega = E[r^2]$ e que $\rho = r/\sqrt{\Omega}$, temos que a distribuição de Rayleigh normalizada fica da forma

$$p_P(\rho) = 2\rho \exp[-\rho^2]. \tag{2.10}$$

Generalizando a distribuição Rayleigh, surgem as distribuições de Rice e Nakagami-m, que possuem um grau de liberdade para descrever melhor o ambiente onde a predição será feita, em que Rice costuma ser utilizada para predizer ambientes com LOS e Nakagami-m, para predizer em NLOS.

2.3.2 Distribuição de Rice

A PDF de Rice é descrita da forma

$$p_R(r) = \frac{2(K+1)r}{\Omega} \exp\left[-K - \frac{(K+1)r^2}{\Omega}\right] I_0\left[2\sqrt{\frac{K(K+1)}{\Omega}}r\right], r \geq 0, K \geq 0, \Omega \geq 0, \quad (2.11)$$

em que $I_n[\cdot]$ é a função de Bessel modificada de primeiro tipo e n-ésima ordem.

O parâmetro K representa a razão entre a potência da componente dominante pela potência total das componentes de multipercurso, sendo que K e Ω podem ser ditos como parâmetros de forma e escala, respectivamente [8].

Normalizando a distribuição de Rice em função de ρ, em que $\rho = r/\sqrt{\Omega}$, obtem-se a expressão

$$p_P(\rho) = 2(K+1)\rho \exp[-K - (K+1)\rho^2] I_0[2\rho\sqrt{K(K+1)}]. \quad (2.12)$$

Na realidade, a distribuição de Rice descreve a distribuição de Rayleigh e mais uma componente de linha de visada. Se essa componente de LOS for anulada, $K \to 0$, a distribuição de Rice torna-se igual à de Rayleigh [4].

Para estimar o parâmetro K de Rice, [8] utiliza-se a expressão

$$K = \frac{\sqrt{1-\xi}}{1-\sqrt{1-\xi}}, \quad (2.13)$$

$$\xi = V[\rho^2]. \quad (2.14)$$

2.3.3 Distribuição de Nakagami-m

A distribuição de Nakagami-m é uma alternativa à distribuição de Rayleigh quando o ambiente apresenta algumas componentes de multipercursos mais fortes do que todas as outras. Quanto mais componentes fortes existirem, maior será o parâmetro m. Em outras palavras, o parâmetro m relaciona-se ao número de componentes do sinal [9]. Se as componentes de multipercurso forem puramente difusas, o m será unitário, e a PDF adquirida iguala-se a distribuição de Rayleigh. Com $0,5 \leq m < 1$, o modelo de Nakagami caracteriza condições de desvanecimento mais severas que os canais de Rayleigh[4] [10]. De acordo com [4] e [8], a distribuição de Nakagami-m e o parâmetro m são descritos da forma

$$p_R(r) = \frac{2}{\Gamma[m]} \left(\frac{m}{\Omega}\right)^m r^{2m-1} \exp\left[-\frac{m}{\Omega}r^2\right], r \geq 0, \quad (2.15)$$

$$m = \frac{E^2[r^2]}{V[r^2]}, m \geq \frac{1}{2} \quad (2.16)$$

em que $\Omega = E[r^2]$, $\Gamma[\cdot]$ é a função Gamma, e $E[\cdot]$ e $V[\cdot]$ são, respectivamente, a esperança e a variância.

Fazendo a normalização $\rho = r/\sqrt{\Omega}$, temos que a PDF de Nakagami-m é descrita da forma

$$p_P(\rho) = \frac{2m^m}{\Gamma[m]}\rho^{2m-1}\exp[-m\rho^2], \tag{2.17}$$

$$m = \frac{1}{V[\rho^2]}, m \geq \frac{1}{2}. \tag{2.18}$$

2.3.4 Distribuição κ-μ

Generalizando ainda mais as distribuições que descrevem o desvanecimento de multipercurso, [9] e [11] propuseram as distribuições κ-μ e α-μ, que já possuem dois graus de liberdade para descrever os ambientes de predição LOS e NLOS, respectivamente.

A distribuição κ-μ considera um sinal composto de *clusters* de ondas de multipercurso propagando-se em um ambiente homogêneo. Dentro de cada *cluster* as fases dessas ondas que chegam dos diversos percursos são aleatórias, tem potências idênticas e possuem atraso de propagação similares, porém cada *cluster* possui uma componente dominante que apresenta uma potência arbitrária. Cada *cluster* possui diferença de atraso de propagação relativamente alta [11].

Similar ao K de Rice, o parâmetro κ é a razão entre a potência total das componentes dominantes pela potência total das ondas espalhadas e o parâmetro μ assemelha-se ao parâmetro m de Nakagami-m e relaciona-se ao número de *clusters* de multipercurso. Para estimá-los, [11] descreve-se

$$\kappa^{-1} = \frac{\sqrt{2}(E[\rho^4]-1)}{\sqrt{2E^2[\rho^4]-E[\rho^4]-E[\rho^6]}} - 2, \tag{2.19}$$

$$\mu = \frac{E^2[r^2]}{V[r^2]}\frac{1+2\kappa}{(1+\kappa)^2}. \tag{2.20}$$

A PDF da envoltória de κ-μ é descrita da forma

$$p_R(r) = \frac{2\mu(1+\kappa)^{\frac{\mu+1}{2}}}{\kappa^{\frac{\mu-1}{2}}\exp[\mu\kappa]\hat{r}}\left(\frac{r}{\hat{r}}\right)^{\mu}\exp\left[-\mu(1+\kappa)\left(\frac{r}{\hat{r}}\right)^2\right]I_{\mu-1}\left[2\mu\sqrt{\kappa(1+\kappa)}\frac{r}{\hat{r}}\right], r, \kappa, \mu \geq 0, \tag{2.21}$$

em que $\hat{r} = \sqrt{E(r^2)}$ e $I_n[\cdot]$ é a função de Bessel modificada de primeiro tipo e n-ésima ordem.

Para a envoltória normalizada $\rho = r/\hat{r}$, a PDF e o parâmetro μ ficam da forma

$$p_P(\rho) = \frac{2\mu(1+\kappa)^{\frac{\mu+1}{2}}}{\kappa^{\frac{\mu-1}{2}}\exp[\mu\kappa]}\rho^{\mu}\exp[-\mu(1+\kappa)\rho^2]I_{\mu-1}[2\mu\sqrt{\kappa(1+\kappa)}\rho], \tag{2.22}$$

$$\mu = \frac{1}{V[\rho^2]}\frac{1+2\kappa}{(1+\kappa)^2}. \tag{2.23}$$

Existe uma aproximação para distribuição κ-μ para valores de $\kappa \to 0$. De acordo com [11], para pequenos argumentos da função Bessel, é verdadeira a relação

$$I_{\nu-1}[z] \approx \frac{1}{\Gamma[\nu]} \left(\frac{z}{2}\right)^{\nu-1}. \tag{2.24}$$

Usando esta relação na equação 2.21, a distribuição κ-μ pode ser reescrita da forma

$$p_R(r) \approx \frac{2\mu(1+\kappa)^{\frac{\mu+1}{2}}}{\Gamma[\mu]\kappa^{\frac{\mu-1}{2}} \exp[\mu\kappa]} \frac{1}{\hat{r}} \left(\frac{r}{\hat{r}}\right)^{\mu} \exp\left[-\mu(1+\kappa)\left(\frac{r}{\hat{r}}\right)^2\right] \left[\mu\left(\frac{r}{\hat{r}}\right)\sqrt{\kappa(1+\kappa)}\right]^{\mu-1}, \tag{2.25}$$

e sua versão normalizada é descrita como

$$p_P(\rho) \approx \frac{2\mu^{\mu}(1+\kappa^{\mu})}{\exp[\mu\kappa]\Gamma[\mu]} \rho^{2\mu-1} \exp[-\mu(1+\kappa)\rho^2]. \tag{2.26}$$

2.3.5 Distribuição α-μ

Ao contrário da distribuição κ-μ, a distribuição α-μ considera um sinal composto de *clusters* de multipercurso propagando-se em um ambiente não-homogêneo, porém com as mesmas características do *cluster* da primeira distribuição (ondas com fases aleatórias, potências idênticas e atrasos de propagação similares) exceto pela presença da componente dominante. Nesta distribuição, a envoltória resultante é obtida de uma função não linear do somatório dos módulos das componentes de multipercurso, sendo que essa não linearidade é manifestada pelo parâmetro de potência $\alpha > 0$. Desta forma, o sinal resultante não é obtido simplesmente pela soma dos módulos das componentes espalhadas, mas sim os módulos elevados a certa potência [9].

Assim como o parâmetro m de Nakagami-m, o parâmetro μ também relaciona-se ao número de componentes do sinal, porém agora elevado à potência α. Isto é,

$$\mu = \frac{E^2[r^{\alpha}]}{V[r^{\alpha}]}, \mu \geq \frac{1}{2}. \tag{2.27}$$

A distribuição α-μ é descrita da forma

$$p_R(r) = \frac{\alpha\mu^{\mu} r^{\alpha\mu-1}}{\hat{r}^{\alpha\mu}\Gamma[\mu]} \exp\left[-\mu\frac{r^{\alpha}}{\hat{r}^{\alpha}}\right], r \geq 0, \tag{2.28}$$

em que $\hat{r} = \sqrt[\alpha]{E[r^{\alpha}]}$. Para a envoltória normalizada $\rho = r/\hat{r}$, a PDF e o parâmetro μ ficam da forma

$$p_P(\rho) = \frac{\alpha\mu^{\mu}\rho^{\alpha\mu-1}}{\Gamma[\mu]} \exp[-\mu\rho^{\alpha}], \tag{2.29}$$

$$\mu = \frac{1}{V[\rho^{\alpha}]}. \tag{2.30}$$

Pode-se notar a similaridade dessa distribuição com a PDF de Nakagami-m. De fato, fazendo o parâmetro de potência $\alpha = 2$, a distribuição α-μ reduz-se a Nakagami-m. A distribuição de Weibull [2], que não foi apresentada anteriormente, também pode ser obtida fazendo $\alpha = 1$.

2.4 Conclusão

Neste capítulo foram descritos a perda de percurso e os fenômenos de desvanecimento de curto e de longo prazos. Foram apresentadas as distribuições que visam modelar tais fenômenos. Nota-se que todas as distribuições são escritas em termos de parâmetros físicos que possibilitam a investigação prática. No capítulo a seguir, será apresentado o processo de composição entre os desvanecimentos de curto e longo prazos a fim de modelar as predições estatíticas em conjunto.

Capítulo 3

Desvanecimento Composto

Modelos de desvanecimento de curto prazo normalmente pressupõem um sinal com potência média constante em determinados ambientes de propagação. Porém, em alguns cenários, devido a presença de sombreamento, a potência média recebida torna-se aleatória. Exemplos de ambientes onde esse fenômeno ocorre são áreas urbanas congestionadas com pedestres e veículos movendo-se ou em sistemas de comunicação por satélite sujeitos ao sombreamento causado pela vegetação ou por elementos presentes em centros urbanos. Como resultado, o ambiente em desvanecimento é composto pelo desvanecimento de multipercurso sobreposto ao sombreamento [12] [13].

Diversos modelos de composição são apresentados na literatura. Talvez um dos mais conhecidos seja o modelo Rayleigh-Lognormal, também chamado de modelo Suzuki, que consiste na combinação do desvanecimento de curto prazo Rayleigh e o sombreamento Lognormal. A principal desvantagem deste modelo é que sua PDF composta não é uma fórmula fechada, tornando-se complicada as avaliações de desempenho, tais como probabilidade média de erro, probabilidade de *outage* e capacidade de canal [14].

Neste capítulo são apresentados modelos compostos utilizando a distribuição Gamma para caracterização do sombreamento e a distribuição genérica α-μ para caracterização do desvanecimento de curto prazo, visto que a partir desta podemos obter as distribuições de Nakagami-m e Rayleigh. Pelo melhor conhecimento dos autores, ainda não encontra-se na literatura a distribuição α-μ/Gamma da forma como foi descrita aqui.

3.1 Processo de Composição

A composição de uma função densidade de probabilidade pode ser deduzida fazendo a sobreposição de duas ou mais distribuições estatísticas. Matematicamente, este método é expresso da seguinte forma

$$p_X(x) = \int_0^\infty p_{X|Y}(x|y)p_Y(y)dy. \tag{3.1}$$

Para o caso do desvanecimento composto, a sobreposição é feita a partir do desvanecimento

de curto prazo e do desvanecimento longo prazo, em que o primeiro compõe o termo $p_{X|Y}(x|y)$, e segundo compõe o termo $p_Y(y)$.

3.2 Distribuição α-μ/Gamma

O processo de composição da função α-μ/Gamma, fazendo $x = r$ e $\hat{r}^\alpha = y$ em (2.28), é descrito da seguinte forma, em que $\Gamma[\cdot]$ é a função Gamma

$$p_R(r_c) = \int_0^\infty \frac{\alpha\mu^\mu r_c^{\alpha\mu-1}}{y^\mu \Gamma[\mu]} \exp\left[-\mu\frac{r_c^\alpha}{y}\right] \frac{1}{\Gamma[m_s]} \left(\frac{m_s}{\Omega_s}\right)^{m_s} .y^{m_s-1} \exp\left[-x\frac{m_s}{\Omega_s}\right] dy. \tag{3.2}$$

Os parâmetros α, μ, m_s e Ω_s são os mesmos parâmetros descritos em (2.5) e (2.28) e, portanto, são estimados da mesma forma. A variável aleatória r_c representa a envoltória composta.

Pode-se observar que este processo de composição é possível visto que o y representa, nos dois desvanecimentos, a potência média do desvanecimento de curto prazo, isto é, a mesma entidade física. Resolvendo a integral temos a seguinte expressão, em que $K_n[\cdot]$ é a função de Bessel modificada de segundo tipo e n-ésima ordem,

$$p_R(r_c) = \frac{2\alpha}{\Gamma[m_s]\Gamma[\mu]} \left(\frac{m_s\mu}{\Omega_s}\right)^{\frac{m_s+\mu}{2}} r_c^{-1+\frac{1}{2}\alpha(m_s+\mu)} K_{m_s-\mu}\left[2r_c^{\frac{\alpha}{2}}\sqrt{\frac{m_s\mu}{\Omega_s}}\right]. \tag{3.3}$$

Fazendo a normalização $\rho_c = r_c/\sqrt[\alpha]{\Omega_s}$, em que $\Omega_s = E[y^\alpha]$, a expressão α-μ/Gamma fica da seguinte forma

$$p_P(\rho_c) = \frac{2\alpha}{\Gamma[m_s]\Gamma[\mu]} (m_s\mu)^{\frac{m_s+\mu}{2}} \rho_c^{-1+\frac{1}{2}\alpha(m_s+\mu)} K_{m_s-\mu}[2\rho_c^{\frac{\alpha}{2}}\sqrt{m_s\mu}]. \tag{3.4}$$

A família de curvas para a PDF $p_P(\rho_c)$ *versus* ρ_c, fixando os parâmetros $\mu = 4/7$, $m_s = 3$ e variando α, é impresso na Figura 3.1. Já na Figura 3.2 foi impresso a família de curvas para essa mesma PDF fixando os parâmetros $\alpha = 7/4$, $m_s = 3$ e variando μ. Uma terceira família de curvas ainda para a PDF $p_P(\rho_c)$ *versus* ρ_c foi impresso na Figura 3.3, porém neste caso os parâmetro α e μ foram fixados em $\alpha = 2,5$ e $\mu = 1,5$, enquanto o parâmetro m_s foi variado. A título de comparação, a curva da PDF que representa um ambiente sem sombreamento, $m_s \to \infty$, também foi mostrada. Vale lembrar que m_s é inversamente proporcional à severidade do sombreamento.

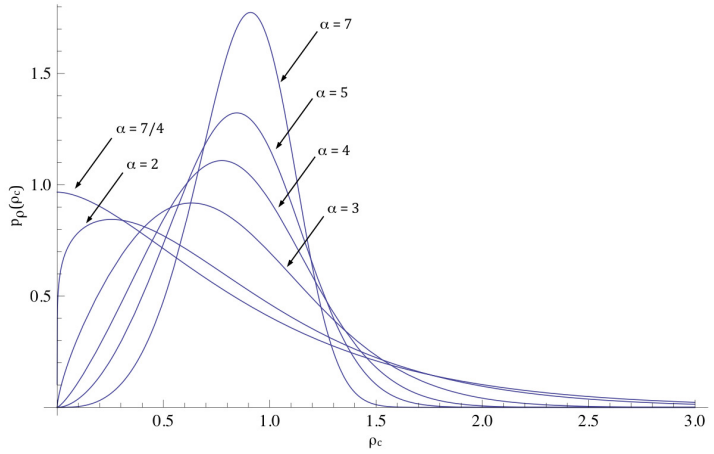

Figura 3.1: Várias curvas da PDF α-μ/Gamma para $\mu = 4/7$ e $m_s = 3$.

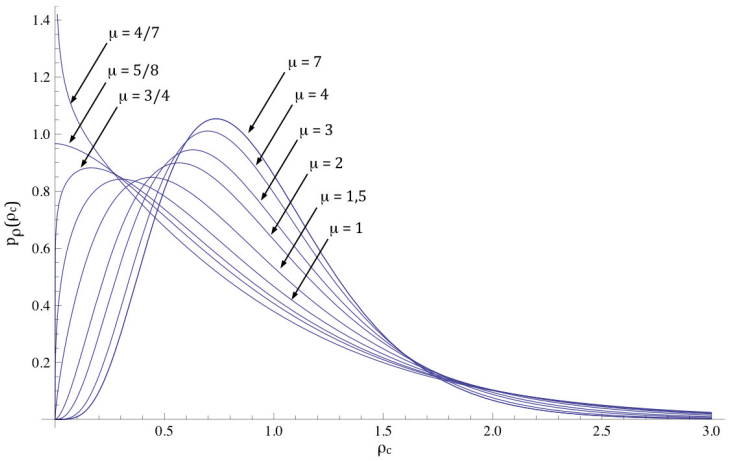

Figura 3.2: Várias curvas da PDF α-μ/Gamma para $\alpha = 7/4$ e $m_s = 3$.

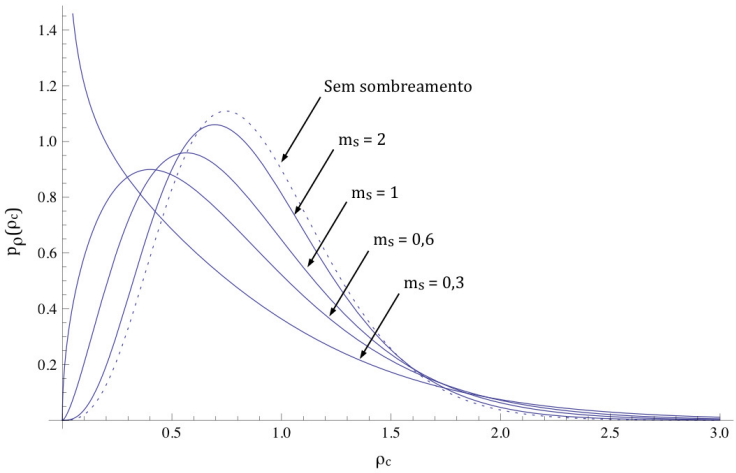

Figura 3.3: Várias curvas da PDF α-μ/Gamma para $\alpha = 2,5$ e $\mu = 1,5$.

3.3 Distribuição Nakagami-m/Gamma

Sabendo que a distribuição α-μ possui como caso especial a Nakagami-m, a expressão para PDF da distribuição composta Nakagami-m/Gamma, fazendo $\alpha = 2$ e $\mu = m$ em (3.3), fica da seguinte forma

$$p_R(r_c) = \frac{4}{\Gamma[m_s]\Gamma[m]} \left(\frac{mm_s}{\Omega_s}\right)^{\frac{m+m_s}{2}} r_c^{-1+m+m_s} K_{m_s-m}\left[2r_c\sqrt{\frac{mm_s}{\Omega_s}}\right]. \tag{3.5}$$

Comparando esta equação com a equação descrita em [6, Eq. 9], pode-se observar a igualdade das mesmas.

Realizando as mesmas mudanças feitas em (3.4), tem-se a versão normalizada.

$$p_P(\rho_c) = \frac{4}{\Gamma[m_s]\Gamma[m]}(mm_s)^{\frac{m+m_s}{2}} \rho_c^{-1+m+m_s} K_{m_s-m}[2\rho_c\sqrt{mm_s}]. \tag{3.6}$$

3.4 Distribuição Rayleigh/Gamma

A distribução Rayleigh também é um caso especial da α-μ. Desta forma, fazendo $\alpha = 2$ e $m = 1$ em (3.3) a distribuição reduz-se à Rayleigh/Gamma.

$$p_R(r_c) = \frac{4}{\Gamma[m_s]} \left(\frac{m_s}{\Omega_s}\right)^{\frac{m_s+1}{2}} r_c^{m_s} K_{m_s-1}\left[2r_c\sqrt{\frac{m_s}{\Omega_s}}\right]. \tag{3.7}$$

Comparando esta equação com a equação descrita em [15, Eq. 3], em que $m_s = \beta + 1$, $\Omega_s = 4m_s(\alpha_{R/G})^2$ e a variável aleatória $r_c = x$, pode-se observar a igualdade das mesmas.

Realizando as mesmas mudanças feitas em (3.4), a versão normalizada fica da seguinte forma

$$p_P(\rho_c) = \frac{4}{\Gamma[m_s]} m_s^{\frac{1+m_s}{2}} \rho_c^{m_s} K_{m_s-1}[2\rho_c\sqrt{m_s}]. \tag{3.8}$$

Capítulo 4

Sistema de Medição

Este capítulo descreve os equipamentos utilizados para realizar as medições de campo, bem como a apresentação e caracterização dos cenários onde os dados foram coletados. Trata também das dificuldades encontradas ao longo do processo de medição para trazer mais facilidade ao leitor interessado em repetir tais procedimentos.

4.1 Sistema de Transmissão e Recepção

O sistema de medição é composto por duas partes. A primeira consiste em um transmissor fixado no topo do prédio SG11 da UnB, transmitindo onda contínua na frequência de 2500 MHz (primeira campanha) ou 780 MHz (segunda campanha). A segunda parte consiste em um sistema de leitura do sinal e armazenamento dos dados, instalado em um carro para simular um receptor móvel. Escolhemos essas duas frequências pois elas fazem parte das faixas utilizadas por tecnologias de quarta geração.

O sistema transmissor é composto por um equipamento gerador de onda contínua, uma antena e um cabo para interligá-los. Como pode ser visto na Figura 4.1, foi utilizado também um tripé com mastro para dar suporte e elevação à antena.

O sistema receptor poderia ser composto simplesmente por um analisador de espectro, uma antena e um amplificador de baixo ruído (LNA - *Low Noise Amplifier*) entre os dois para melhorar o nível de recepção do sinal. Contudo, para que se possa armazenar e, posteriormente, analisar os dados obtidos, é necessário conectar este sistema a um computador. Como os dados originados pela saída de vídeo do analisador de espectro são analógicos e o computador só os entende em formato digital, é necessário colocar um conversor analógico/digital entre eles. A Figura 4.2 mostra como ficou a montagem deste sistema.

Para alimentar os sistemas transmissor e receptor é necessário conferir o valor e a forma de onda da tensão de entrada dos equipamentos. O gerador de sinal e o computador, apesar de terem suas próprias baterias, foram ligados à alimentação externa para que as campanhas de medições não ficassem limitadas ao tempo de autonomia dessas baterias. Como o gerador de sinal não precisa

Figura 4.1: Sistema de transmissão

Figura 4.2: Sistema de recepção

se mover, liga-se seu adaptador AC à rede pública. Para o sistema receptor, a alimentação veio a partir da bateria do carro. Novamente, este sistema também poderia utilizar uma bateria própria, contudo o funcionamento do sistema se limitaria à autonomia da bateria. A bateria é ligada a um inversor que transforma a tensão de 12 V DC em 220 V AC. Este por sua vez, alimenta o adaptador AC do computador, o analisador de espectro e uma fonte digital que novamente transforma a tensão de 220 V AC em 15 V DC para alimentar o amplificador de baixo ruído. É interessante observar

que esta fonte digital poderia ser eliminada do sistema se houvesse um cabo apropriado para ligar a bateria do carro diretamente no LNA. Contudo, esta ligação direta diminuiria a amplificação do sinal recebido, visto que a alimentação não seria de 15 V. O conversor analógico/digital é alimentado pelo computador via cabo USB. A Figura 4.3 mostra o diagrama com as ligações do sistema de medição.

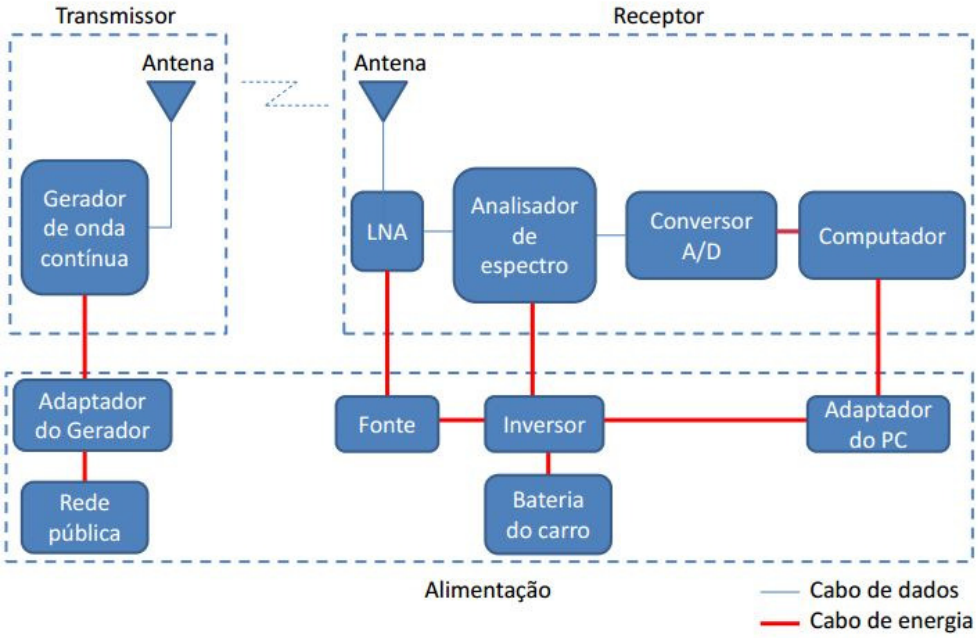

Figura 4.3: Diagrama do sistema de medição

4.1.1 Gerador de Onda Contínua

O gerador de onda contínua utilizado foi o FieldFox RF Analyser N9912A [16] da Agilent Technologies ilustrado na Figura 4.4. O equipamento foi configurado como uma fonte independente de onda contínua com 0 dB de atenuação. O sinal gerado tem potêcia igual a 7 dBm e foram utilizadas duas frequências durante as campanhas de medição, 2500 MHz e 780 MHz.

Figura 4.4: Gerador de onda contínua

4.1.2 Antena

O par de antenas utilizado depende da campanha de medição executada. Na primeira campanha, foram capturados dados na frequência de 2500 MHz. Para isto, utilizou-se o par de antenas Omnidirecionais MM-2412o da Aquário [17] que trabalham na faixa de frequência de 2400 MHz a 2500 MHz e possuem um ganho de 12 dBi. É importante observar que houve alguma dificuldade na instalação desta antena no sistema receptor (carro), visto que ela precisava se manter firmemente polarizada ao longo do percurso. Uma solução encontrada foi utilizar a peça que serve para instalar a antena em suportes (evidenciada na figura 4.5) e prensá-la entre a porta e o vidro fechado do carro, e passar o cabo que liga a antena ao analisador de espectro pela pequena fresta que ainda encontrava-se aberta. Apesar de não ser a solução mais apropriada, a antena manteve-se firme ao longo da campanha.

Na segunda campanha de medição, foram capturados dados na frequência de 780 MHz. Para esta campanha, utilizou-se o par de antenas Omnidirecionais MU-35CI [18] que atua na faixa de 820 MHz a 860 MHz com ganho de 3,5 dBi. A instalação desta antena no carro foi mais simples que a anterior, visto a presença de uma base imantada que fixa-se facilmente ao teto do veículo. Vale observar ainda que nesta instalação o teto do veículo ainda faz o papel de plano terra e pode resultar em ganho adicional à antena.

Figura 4.5: Antenas e cabos

4.1.3 Amplificador de Baixo Ruído (LNA)

O amplificador de baixo ruído utilizado foi o ZHL-1724HLN-S da Mini-Circuits [19]. Este equipamento amplifica sinais na faixa de frequência de 1700 MHz a 2400 MHz e pode ser alimentado com tensões DC de 12 V, 15 V ou 16 V, sendo que para cada frequência e tensão há um ganho específico.

É importante observar que as duas campanhas de medição utilizaram o LNA, porém nenhuma delas trabalhava com a frequência de utilização especificada para o equipamento. Este uso pode levar a um efeito inverso do que se quer, isto é, em vez de amplificar o sinal pode-se reduzi-lo. Isto,

contudo, não foi o que ocorreu, sendo que o sinal teve uma amplificação significativa.

Como o escopo deste projeto trabalha com a variação de sinal recebido, não se faz necessário saber com precisão o ganho do sinal gerado pelo LNA, mas sim saber se há ganho de sinal e se é conveniente a sua utilização. O ganho se faz necessário devido à figura de ruído capturada pelo analisador de espectro, que limita a análise do sinal recebido a uma potência mínima de aproximandamente -72 dBm. Se o sinal recebido for menor que essa figura de ruído, a análise do desvanecimento de longo prazo e, portanto, todo o restante do estudo fica comprometido.

Figura 4.6: Amplificador de baixo ruído

4.1.4 Analisador de Espectro

O analisador de espectro utilizado foi o HP Agilent 8593E [20]. As configurações utilizadas foram:

- Frequência central: 2500 MHz na primeira campanha e 780 MHz na segunda campanha;
- *Vídeo Bandwidth* (VBW): 30 Hz;
- *Resolution Bandwidth* (RBW): 10 KHz;
- *Peak Search*;
- *Zero Span*;
- *Sweep Time*: 15 ms.

4.1.5 Conversor Analógico/Digital

O conversor A/D utilizado foi o LabJack U12 [21], que possui a capacidade de gerar 300 amostras em um segundo. Durante o processo de captura, para que se possa capturar as informações do desvanecimento de curto prazo do sinal, é necessário que a razão entre a velocidade de deslocamento do móvele a taxa de amostragem seja menor que metade de um comprimento de onda [2]. Desta forma, quanto mais amostras forem capturadas em um determinado instante, melhor será para a análise deste desvanecimento.

Figura 4.7: Analisador de espectro

Figura 4.8: Conversor analógico/digital

Para que o computador consiga entender os dados enviados pelo conversor, é preciso a instalação de um *software* disponível no site do fabricante sobre o sistema operacional Windows. O programa instalado se divide em diversos aplicativos, sendo que o de interesse para o projeto foi o LJstream. Este aplicativo possui uma interface que permite escolher a quantidade de amostras que serão exploradas por segundo (*Scan Rate*); o número de amostras (*Number of Scans*) a serem coletadas do analisador de espectro a cada iteração do programa; a opção de escrita em arquivo, bem como o local e o arquivo a ser gravado; e as configurações dos canais.

A configuração do canal é um item muito importante, pois permite, através da inserção de uma equação, a conversão do sinal recebido. Como o programa recebe os sinais em volts e deseja-se que ele registre os sinais em dBm observados no analisador de espectro, é necessário determinar a equação da curva que associa a tensão *versus* a potência observadas.

As configurações utilizadas nesse programa foram:

- *Scan Rate*: 300;
- *Number of Scans*: 300;
- Equação da curva: 77,694V - 74,135;

A curva de calibração foi obtida a partir de uma análise prática que comparava os valores de potência exibidos na analisador de espectro e os valores recebidos pelo computador conectado ao

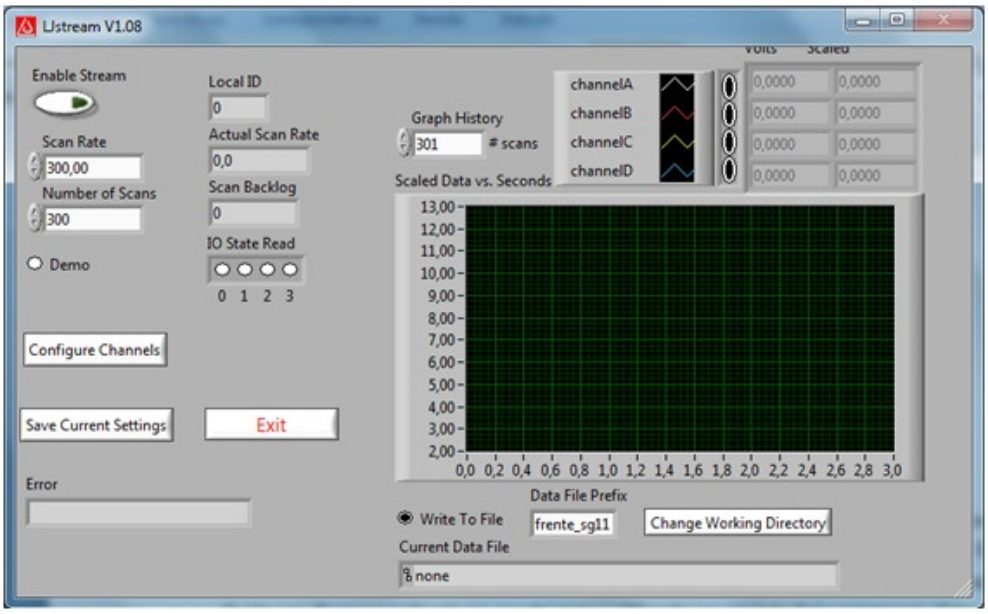

Figura 4.9: Interface do aplicativo LJstream

conversor A/D. Vale ressaltar que a equação da curva depende das configurações utilizadas no analisador de espectro e do próprio analisador. Em um primeiro momento foi utilizado o Agilent E4402B, uma vez que que o seu tempo de varredura mínimo é de 10 μs. Porém, após passar pela mesma análise para adquirir a curva de calibração, percebeu-se que a mesma não mantinha uma associação linear entre a tensão observada no programa e a potência registrada no analisador de espectro.

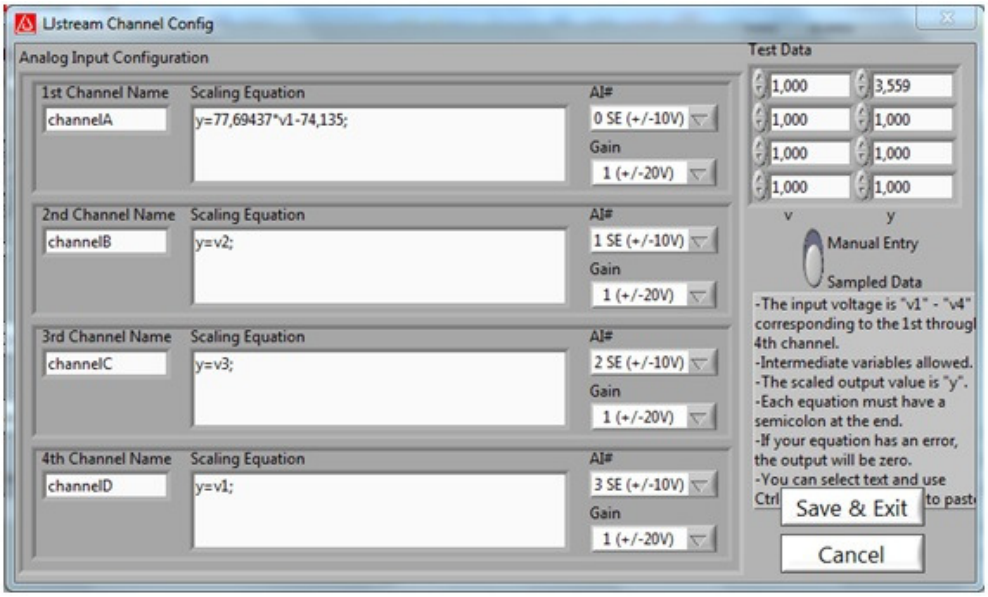

Figura 4.10: Interface de configuração do canal no aplicativo LJstream

4.2 Cenários de Medições

As duas campanhas de medições realizadas, foram feitas em ambientes *outdoor*. Devido a baixa potência de transmissão do sinal (EIRP de aproximadamente 19 dBm na primeira campanha e 10,5 dBm na segunda campanha), o cenário de aquisição limitou-se a poucas centenas de metros do transmissor localizado no topo do prédio SG11 do *campus* Darcy Ribeiro da UnB.

Figura 4.11: Caminhos percorridos nas campanhas de medições

Enquanto o transmissor permanecia fixado a uma altura próxima de 12 metros do solo, o carro com o sistema receptor instalado percorria os caminhos pré-determinados à velocidade constante de 20 km/h. É importante ressaltar esta questão da velocidade constante, visto que ela que determina o espaçamento igual entre as amostras. Com velocidade variável pode-se capturar grande quantidade de amostras de um local onde há a presença de forte desvanecimento enquanto que em outro lugar de desvanecimento fraco pode-se capturar pouca quantidade de amostras. Desta forma, a captura de amostras poderá ficar tendenciosa.

Pode-se classificar os cenários de medição como um ambiente suburbano, visto a presença de alguns poucos prédios baixos entre o transmissor e o receptor, responsáveis pelo sombreamento e o multipercurso do sinal de transmissão. Em situações onde não há linha de visada (NLOS), o sinal recebido pelo receptor é resultado principalmente de espalhamentos gerados nas laterais dos prédios e da difração acima e em torno deles [3].

Vale ressaltar que a análise dos dados fica mais facilitada se os caminhos percorridos forem radiais, visto que o cálculo da perda de percurso, utilizado para analisar o desvanecimento de longo prazo, é feito considerando-se a distância entre o transmissor e o receptor. Boa parte das aquisições deste projeto não levou isto em consideração, de forma que para a posterior análise dos dados foi necessário a divisão do percurso em dois momentos: o primeiro em que o veículo está aproximando-se do transmissor e o segundo em que o veículo está afastando-se. Se não fosse feita esta divisão, para uma mesma distância teria-se dois sinais distintos.

Após analisar os resultados das medições, foram escolhidos alguns percursos que melhor tiveram os modelos de predição ajustados. As nomenclaturas dos caminhos, escolhidas de forma a lembrar o local percorrido, e algumas características do ambiente são dadas a seguir.

4.2.1 Cenário 1

O percurso feito neste cenário é marcado pela presença de construções e árvores de pouca folhagem em torno da rua por onde o receptor passa. Estes dois elementos são capazes de refletir e espalhar o sinal propagado, de forma que pode-se esperar então que o sinal recebido seja bem caracterizado pelo desvanecimento de multipercurso. A Figura 4.12 mostra imagens deste cenário, evidenciando pela linha amarela o caminho percorrido. Ao longo do restante deste trabalho, este cenário será chamado de "Fundo_SG11".

Figura 4.12: Caminho percorrido ao fundo do prédio SG11.

4.2.2 Cenário 2

Neste cenário, o percurso é feito por entre duas construções, sendo que um deles retira a linha de visada entre o transmissor e o receptor. Próximo ao transmissor, há também a presença de algumas árvores de pouca folhagem. Assim como no cenário anterior, estas duas edificações são capazes de refletir e espalhar o sinal propagado. A Figura 4.13 mostra imagens deste cenário, evidenciando pela linha amarela o caminho percorrido. Ao longo do restante deste trabalho, este cenário será chamado de "Frente_SG11".

Figura 4.13: Caminho percorrido em frente do prédio SG11.

4.2.3 Cenário 3

Este cenário é marcado pela presença em quase todo o percurso de diversas árvores pequenas de pouca folhagem entre o transmissor e o receptor. Ao fim do caminho, percebe-se a presença de uma construção capaz de sombrear o sinal recebido. A Figura 4.14 mostra imagens deste cenário, evidenciando pela linha amarela o caminho percorrido. Ao longo do restante deste trabalho, este cenário será chamado de "Frente_FE", por percorrer a frente do prédio da Faculdade de Educação.

Figura 4.14: Caminho percorrido em frente do prédio da FE.

4.2.4 Cenário 4

Pode-se observar pela Figura 4.15 que a área deste cenário é mais aberta que as demais, sendo, portanto, alvo menor de sinais de multipercurso. Contudo, durante um trecho do percurso, ainda temos a presença de algumas árvores de pouca folhagem próximas do transmissor, o que causa o espalhamento do sinal e gera alta densidade de desvanecimento de curto prazo. Durante o meio do percurso, é interessante observar também, que o receptor passa por de trás de uma extensa construção, o que pode causar algum sombreamento. Ao longo do restante deste trabalho, este cenário será chamado de "L3", devido ao nome da avenida que foi utilizada durante o percurso.

Figura 4.15: Caminho percorrido na avenida L3.

4.3 Conclusão

Neste capítulo o sistema de transmissão e recepção foram apresentados, bem como quatro cenários de aquisição de dados onde foram observados melhores resultados. Nota-se que em todos estes cenários descritos existem caracteristicas de sombreamento e multipercurso. No capítulo a seguir, as PDFs de desvanecimento composto destes resultados serão apresentados, assim como a forma como os dados foram tratados.

Capítulo 5

Caracterização Estatística de Canais Sem Fio em Desvanecimento Composto

Este capítulo apresenta a forma como os dados coletados durante as campanhas de medições foram processados e faz uma investigação analítica e gráfica dos resultados encontrados modelando, a partir das funções densidade de probabilidade conhecidas, o desvanecimentos composto em cada um dos cenários descritos no Capítulo 4.

5.1 Processamento de dados

Após a captura e armazenamento dos dados no computador, iniciou-se o processo de análise dos mesmos. O software utilizado para tal fim foi o *Wolfram Mathematica 8.0* que, a partir do *script* criado, foi capaz de fazer todo o tratamento prévio para selecionar apenas os dados necessários dentro do arquivo salvo, os cálculos dos vetores e, por fim, a geração dos gráficos das PDFs. Os passos a seguir descrevem com exatidão o algoritmo seguido durante o processo de análise dos dados.

1. Seleção de um dos arquivos armazenados durante as campanhas de medição;
2. Tratamento do arquivo retirando os dados desnecessários, deixando apenas os vetores tempo e potência;
3. Transformação do vetor tempo em distância;
4. Identificação do ponto do percurso mais próximo para dividir a aquisição entre os dados onde o veículo encontra-se afastando e os dados onde o mesmo encontra-se aproximando;
5. Obtenção do vetor que engloba a perda de percurso e o sombreamento a partir da média móvel de 45λ dos dados selecionados;
6. Cálculo da regressão não linear sobre o vetor obtido acima na forma *a + b*Log(d)* para identificar a componente de perda de percurso;

7. Obtenção do vetor de perda de percurso a partir da expressão da regressão não linear e da distância associada a cada amostra;

8. Obtenção do vetor de desvanecimento de curto prazo retirando dos dados adquiridos a perda de percurso e o sombreamento;

9. Obtenção do vetor de desvanecimento de longo prazo retirando a perda de percurso do vetor obtido no item 5;

10. Obtenção do vetor de desvanecimento composto a partir da soma dos vetores de desvanecimento de curto prazo e longo prazo;

11. Normalização em potência do vetor de desvanecimento de longo prazo, criação de sua PDF e comparação com as PDFs Gamma e Lognormal normalizadas;

12. Normalização em envoltória do vetor de desvanecimento de curto prazo, criação de sua PDF e comparação com as PDFs de Rayleigh, Nakagami-m, Rice, α-μ e κ-μ normalizadas

13. Normalização em envoltória do vetor de desvanecimento composto, criação de sua PDF e comparação com as PDFs de Rayleigh/Gamma, Nakagami-m/Gamma, e α-μ/Gamma normalizadas;

14. Cálculo do erro entre a curva para a PDF empírica e as curvas para as PDFs teóricas.

5.2 Resultados Obtidos

Como visto no Capítulo 4, as campanhas de medições foram realizadas tanto na frequência de 780 MHz quanto na frequência de 2500 MHz. Após avaliar todos os resultados adquiridos a partir dos dados coletados constatou-se que diversos deles contiveram momentos em que a potência recebida ficava abaixo do limite de -72 dBm imposto pelo limiar inferior configurado no analisador de espectro pela figura de ruído do sistema. Como isto compromete a criação do vetor que engloba a perda de percurso e o sombreamento (devido a criação de uma média móvel fora da realidade) e consequentemente todo o resultado, estas aquisições foram consideradas inapropriadas e, portanto, descartadas. Os resultados analisados aqui são aqueles que melhor foram ajustados pelos modelos de predição mencionados no Capítulo 3. Apesar das comparações das PDFs de desvanecimento de longo prazo e de curto prazo terem sido feitas no programa, as mesmas não serão apresentadas aqui visto que não é o foco do trabalho.

Como descrito no Capítulo 4, foram escolhidos quatro cenários para a análise dos resultados tanto na frequência de 780 MHz quanto na frequência de 2500 MHz. As nomenclaturas mnemônicas escolhidas para eles foram: Fundo_SG11, Frente_SG11, L3 e Frente_FE.

5.2.1 Fundo_SG11

Os valores de potência recebidos ao longo da medição feita neste cenário para as frequências de 780 MHz e de 2500 MHz são exibidos, respectivamente, nas Figuras 5.1 e 5.2.

Os parâmetros estimados para cada modelo de desvanecimento para este cenário estão descritos na Tabela (5.1).

Tabela 5.1: Parâmetros calculados para o cenário Fundo_SG11.

Frequência	m_s	m	α	$\mu_{\alpha-\mu}$
780 MHz	13,7025	1,21339	1,82551	1,45969
2500 MHz	1,66536	1,83304	2,1955	1,52408

Em seguida é possível observar a comparação do desvanecimento composto da PDF empírica com as PDFs teóricas para 780 MHz (Fig.5.3) e 2500 MHz (Fig.5.4).

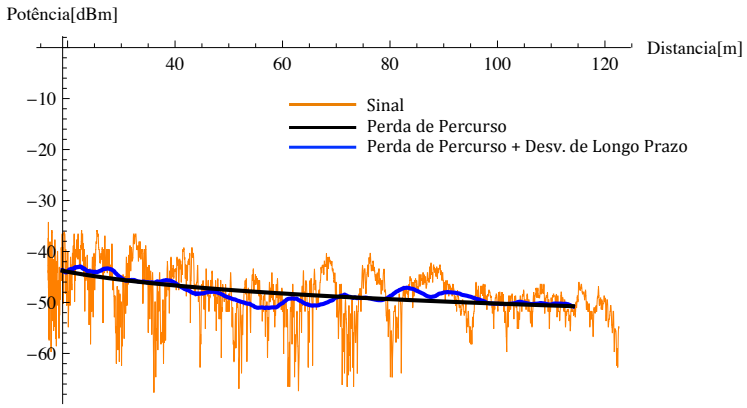

Figura 5.1: Aquisição de potência *versus* distância em 780 MHz no cenário Fundo_SG11.

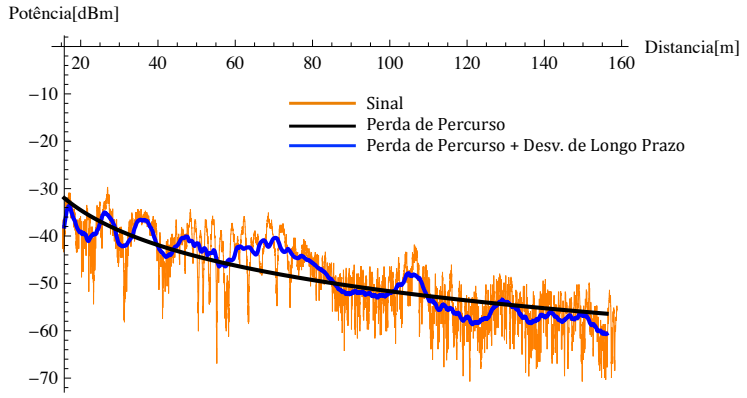

Figura 5.2: Aquisição de potência *versus* distância em 2500 MHz no cenário Fundo_SG11.

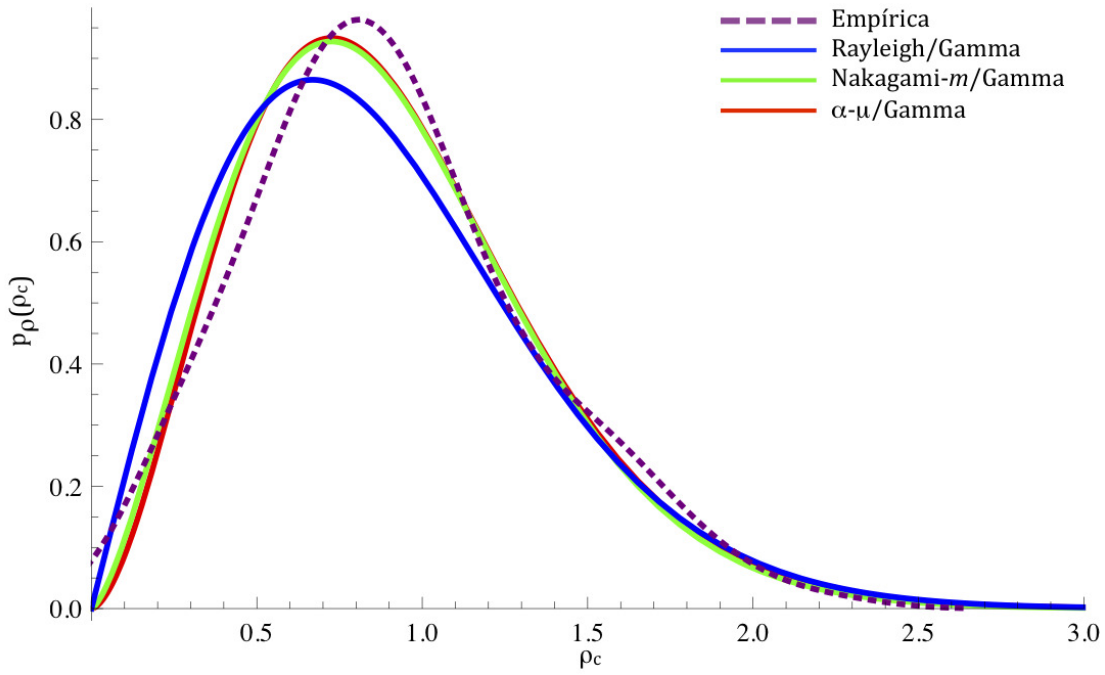

Figura 5.3: Comparação das PDFs teóricas e PDF adquirida para desvanecimento composto em 780 MHz no cenário Fundo_SG11.

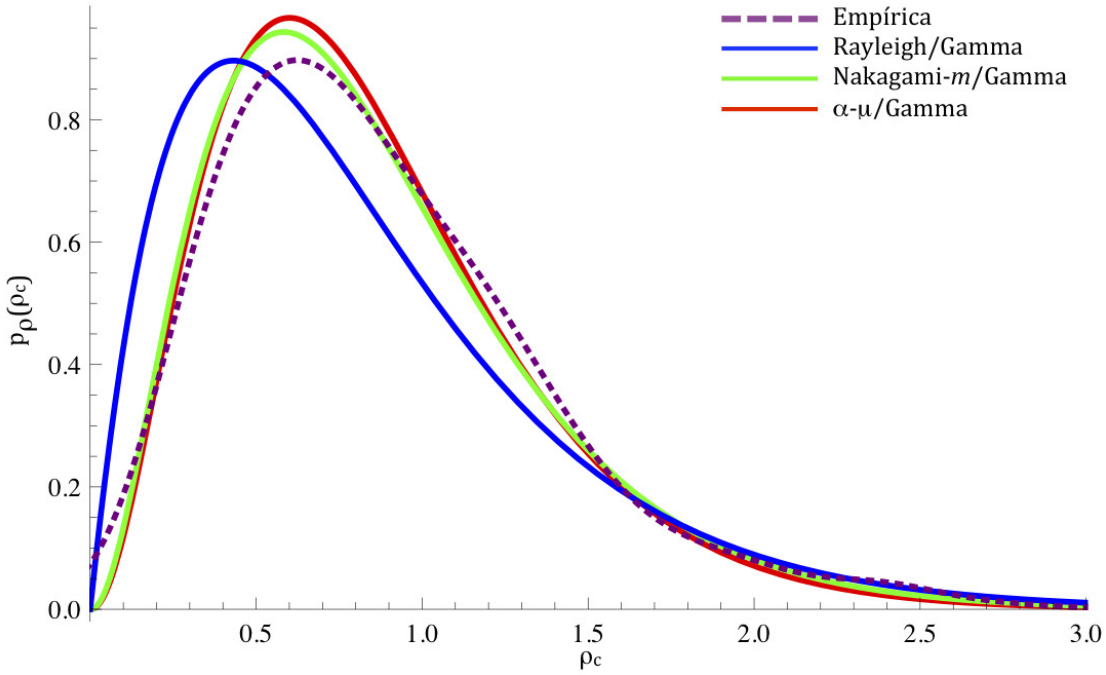

Figura 5.4: Comparação das PDFs teóricas e PDF adquirida para desvanecimento composto em 2500 MHz no cenário Fundo_SG11.

5.2.2 Frente_SG11

As potências recebidas ao longo da medição feita neste cenário para as frequências de 780 MHz e de 2500 MHz são exibidas, respectivamente, nas Figuras 5.5 e 5.6.

Os parâmetros estimados de cada distribuição de desvanecimento para este cenário estão descritos na Tabela (5.2).

Tabela 5.2: Parâmetros calculados para o cenário Frente_SG11.

Frequência	m_s	m	α	$\mu_{\alpha-\mu}$
780 MHz	2,22679	0,969105	1,8606	1,12158
2500 MHz	8,87361	1,42966	1,54075	2,44196

Em seguida é possível observar a comparação do desvanecimento composto entre a PDF empírica e as PDFs teóricas para 780 MHz (Fig.5.7) e 2500 MHz (Fig5.8).

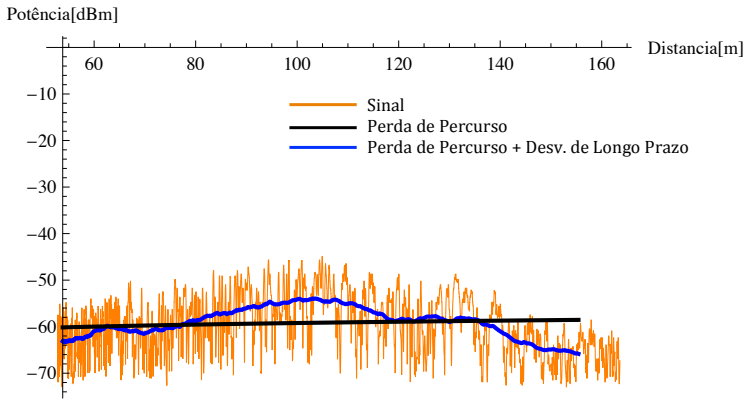

Figura 5.5: Aquisição de potência *versus* distância em 780 MHz no cenário Frente_SG11.

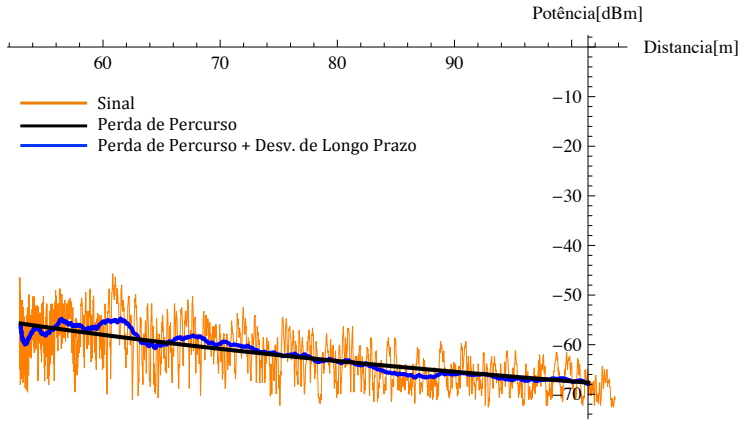

Figura 5.6: Aquisição de potência *versus* distância em 2500 MHz no cenário Frente_SG11.

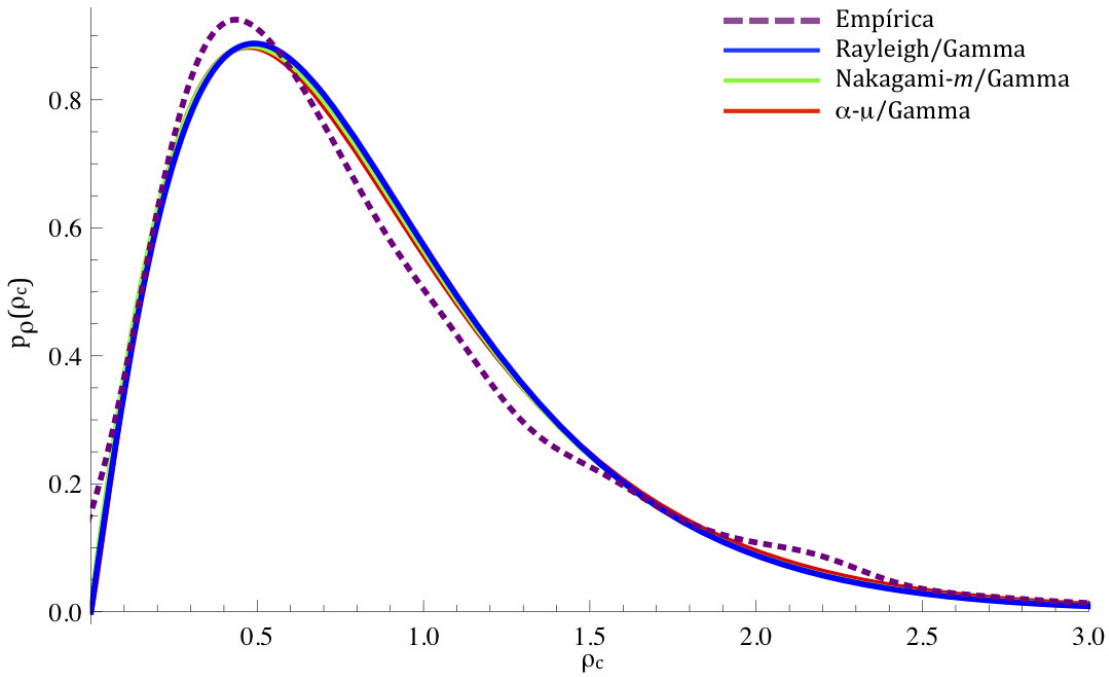

Figura 5.7: Comparação das PDFs teóricas e PDF adquirida para desvanecimento composto em 780 MHz no cenário Frente_SG11.

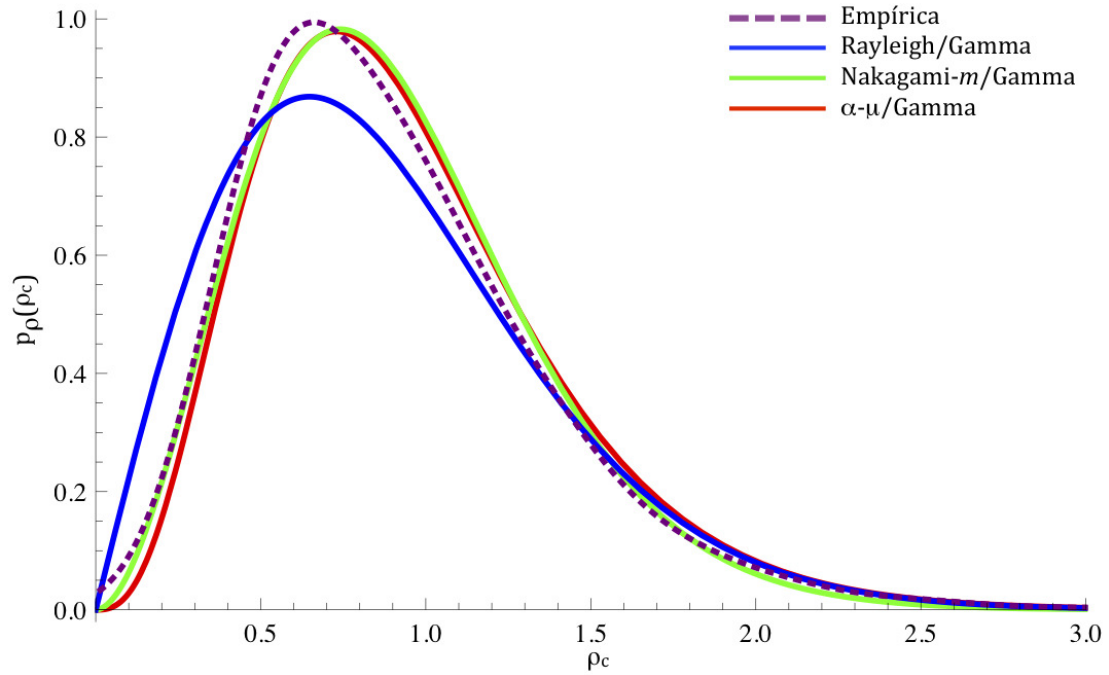

Figura 5.8: Comparação das PDFs teóricas e PDF adquirida para desvanecimento composto em 2500 MHz no cenário Frente_SG11.

5.2.3 L3

Os valores de potência recebidos ao longo da medição feita neste cenário para as frequências de 780 MHz e de 2500 MHz são exibidos, respectivamente, nas Figuras 5.9 e 5.10.

Os parâmetros estimados para cada distribuição para este cenário estão descritos na Tabela (5.3).

Tabela 5.3: Parâmetros calculados para o cenário L3.

Frequência	m_s	m	α	$\mu_{\alpha-\mu}$
780 MHz	4,36488	1,98902	1,46276	3,77269
2500 MHz	1,12462	1,80631	0,927822	8,9572

Em seguida é possível observar a comparação do desvanecimento composto entre a PDF empírica com as PDFs teóricas para 780 MHz (Fig.5.11) e 2500 MHz (Fig.5.12).

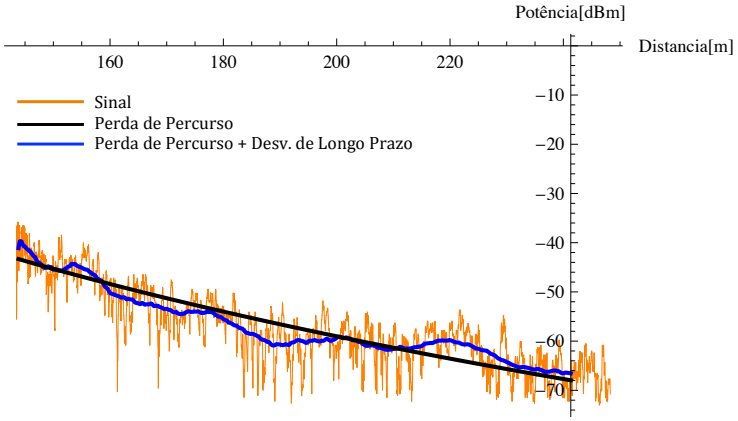

Figura 5.9: Aquisição de potência *versus* distância em 780 MHz no cenário L3.

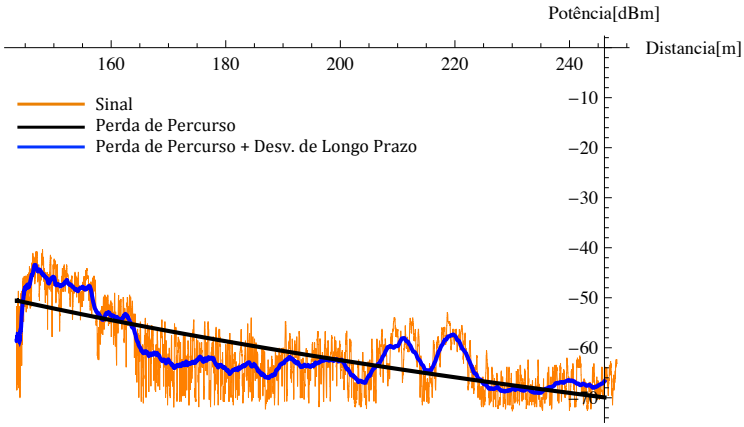

Figura 5.10: Aquisição de potência *versus* distância em 2500 MHz no cenário L3.

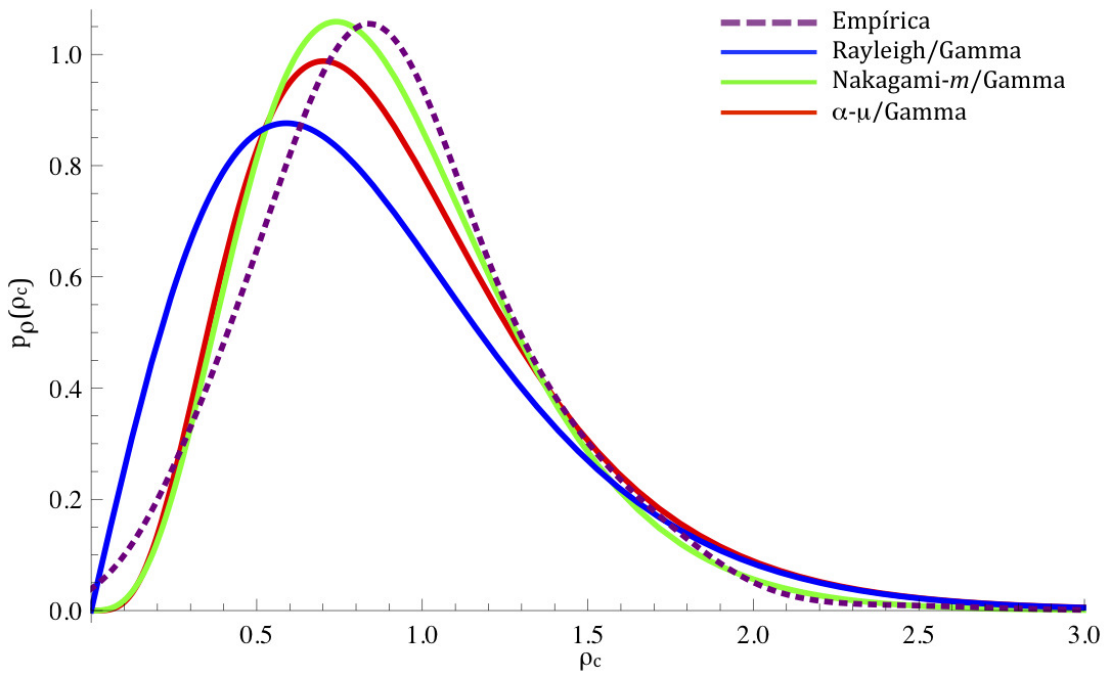

Figura 5.11: Comparação das PDFs teóricas e PDF adquirida para desvanecimento composto em 780 MHz no cenário L3.

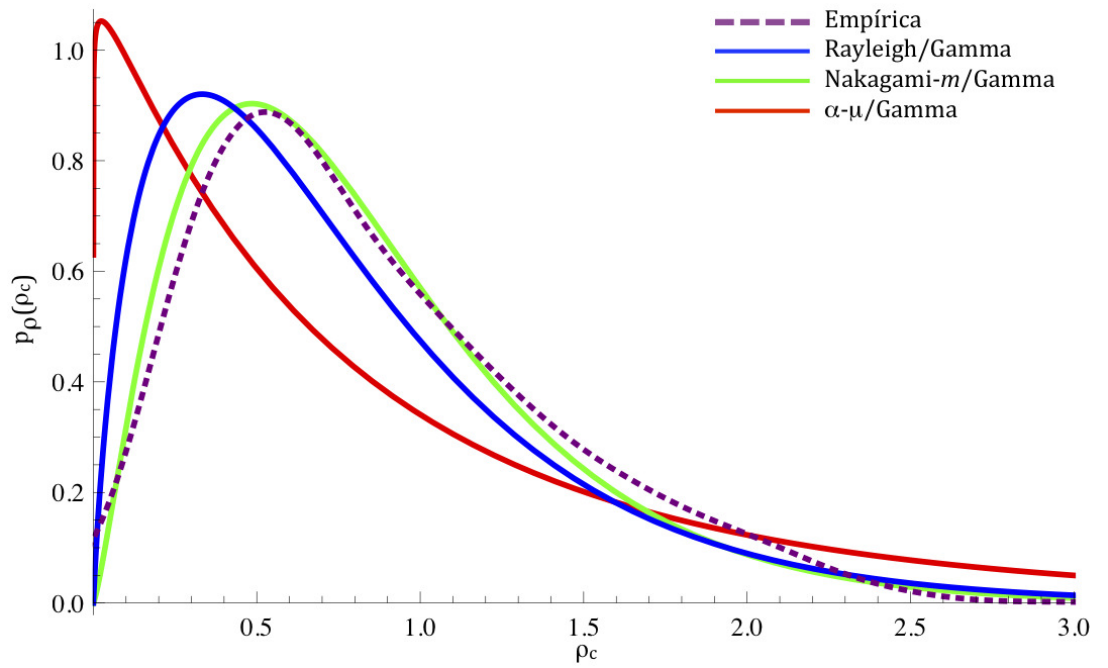

Figura 5.12: Comparação das PDFs teóricas e PDF adquirida para desvanecimento composto em 2500 MHz no cenário L3.

5.2.4 Frente_FE

Os valores de potência recebidos ao longo da medição feita neste cenário para as frequências de 780 MHz e de 2500 MHz são exibidos, respectivamente, nas Figuras 5.13 e 5.14.

Os parâmetros estimados para cada modelo para este cenário estão descritos na Tabela (5.4).

Tabela 5.4: Parâmetros calculados para o cenário Frente_FE.

Frequência	m_s	m	α	$\mu_{\alpha-\mu}$
780 MHz	3,46916	1,47907	2,33594	1,09093
2500 MHz	2,80017	1,2642	0,99684	5,48684

Em seguida é possível observar a comparação do desvanecimento composto da PDF empírica com as PDFs teóricas para 780 MHz (Fig.5.15) e 2500 MHz (Fig.5.16).

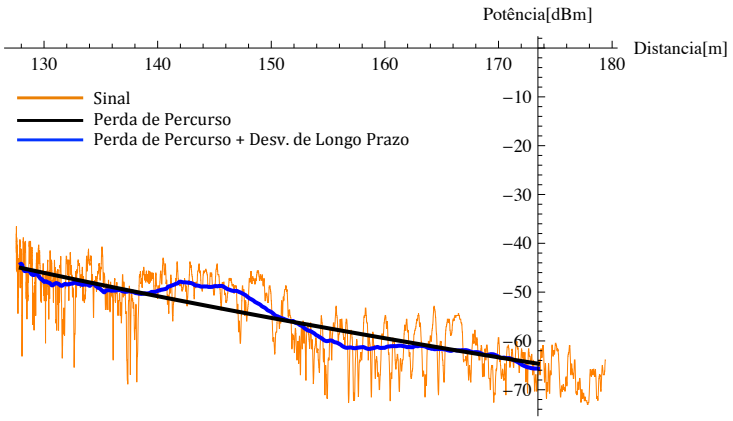

Figura 5.13: Aquisição de potência *versus* distância em 780 MHz no cenário Frente_FE.

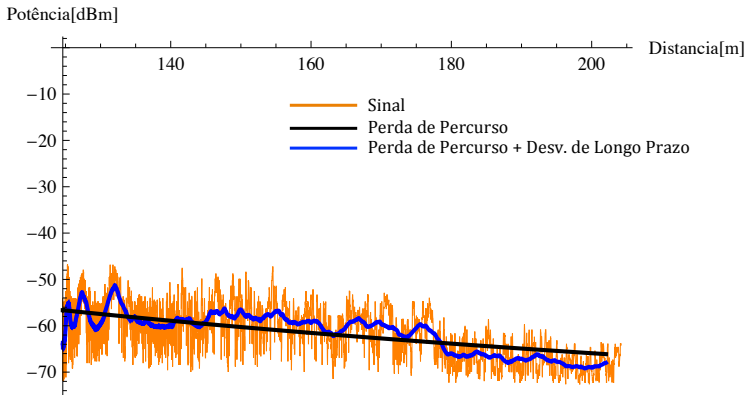

Figura 5.14: Aquisição de potência *versus* distância em 2500 MHz no cenário Frente_FE.

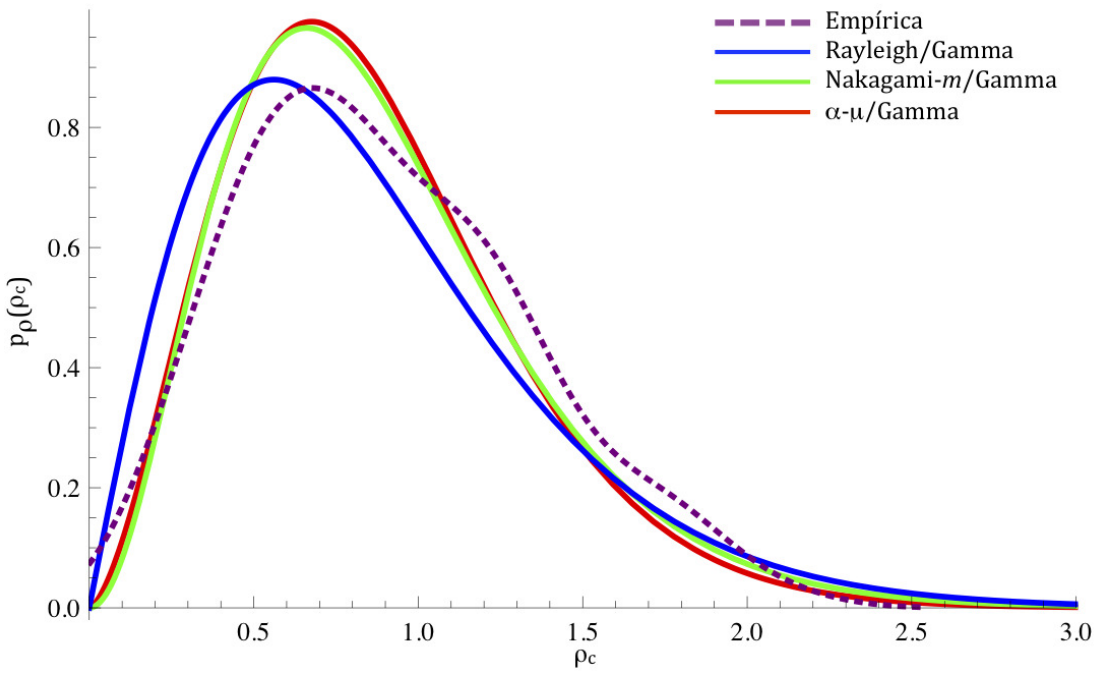

Figura 5.15: Comparação das PDFs teóricas e PDF adquirida para desvanecimento composto em 780 MHz no cenário Frente_FE.

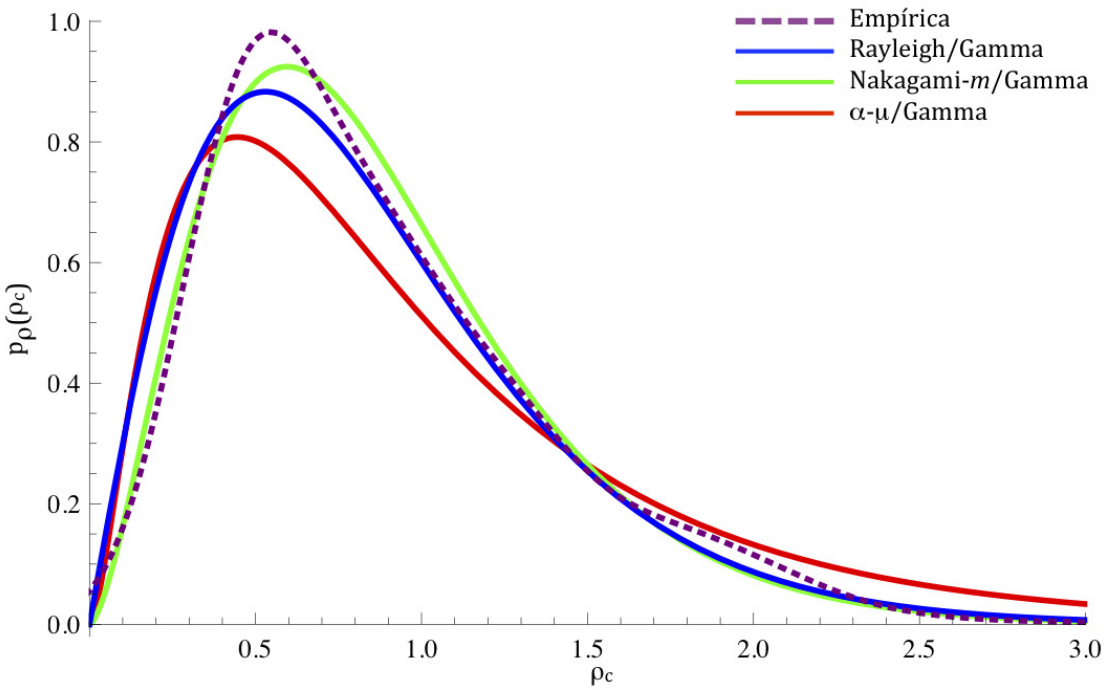

Figura 5.16: Comparação das PDFs teóricas e PDF adquirida para desvanecimento composto em 2500 MHz no cenário Frente_FE.

5.3 Erros das PDFs

Nessa seção, é mostrado o erro calculado entre as PDFs empíricas e as PDFs teóricas para cada distribuição em cada um dos cenários tanto para 780 MHz como para 2500 MHz. Essa análise nos permite confrontar as curvas numericamente e medir o quanto cada curva teórica se ajusta à curva empírica. O cálculo do erro foi feito de acordo com a equação

$$\varepsilon_{PDF} = E[f_{emp} - f_{dist}], \tag{5.1}$$

em que $E[\cdot]$ é o operador esperança. A Tabela (5.5) apresenta os erros encontrados.

Tabela 5.5: Erros das PDFs.

Cenário	**Rayleigh/Gamma**	**Nakagami-m/Gamma**	**α-μ/Gamma**
Fundo_SG11 para 780 MHz	11,0016	7,91675	7,27715
Fundo_SG11 para 2500 MHz	9,84002	4,3416	3,91141
Frente_SG11 para 780 MHz	4,62746	4,63341	4,50869
Frente_SG11 para 2500 MHz	7,31411	3,92185	3,38248
Frente_FE para 780 MHz	12,1622	7,21367	7,93036
Frente_FE para 2500 MHz	5,94252	4,82819	9,14191
L3 para 780 MHz	13,9161	5,8798	7,76313
L3 para 2500 MHz	10,4209	5,68182	16,5979

5.4 Conclusão

A partir da tabela 5.5 é possível observar que para os dois primeiros cenários tanto para 780 MHz como para 2500 MHz a distribuição composta α-μ/Gamma apresentou melhor ajuste aos dados prático. Já para o terceiro e quarto cenários, também para as duas frequências utilizadas, a distribuição composta Nakagami-m/Gamma ajustou-se melhor.

Capítulo 6

Conclusões

6.1 Consideracões Finais

A robustez desejada aos sistemas de comunicação sem fio exige um melhor planejamento que consiga caracterizar os canais de comunicação a fim de prover meios para vencer os desafios encontrados na propagação do sinal sem fio devido a atenuação do sinal pela distância e pelas suas características aleatórias.

Objetivando a caracterização do canal sem fio sujeito tanto ao desvanecimento de longo prazo quanto ao desvanecimento de curto prazo, este trabalho obteve em fórmula fechada uma nova expressão para a distribuição α-μ/Gamma que possui como casos particulares as distribuições Rayleigh/Gamma e Nakagami-m/Gamma, que podem ser encontradas na literatura. A função densidade de probabilidade dessa distribuição pode ser considerada como uma ferramenta matemática útil em aplicações relacionadas a avaliação do desempenho da comunicação sem fio sobre canais compostos.

Medições de campo foram realizadas nas frequências de 780 MHz e 2500 MHz no campus da UnB com a intenção de modelar canais radio móvel e realizar uma investigação na prática da distribuição composta α-μ/Gamma. Para a execução destas contribuições experimentais, foi construído um sistema transmissor de onda contínua e um receptor capaz de armazenar os dados capturados. Foi feito ainda um programa para o processamento desses dados. A análise realizada confrontou PDFs empíricas com as PDFs teóricas para os modelos Rayleigh/Gamma, Nakagami-m/Gamma e α-μ/Gamma. A partir da sobreposição das curvas empíricas com as curvas teóricas e do cálculo do erro entre elas foi possível descrever o modelo que melhor caracteriza o canal rádio móvel em cada um dos cenários medidos.

6.2 Trabalhos Futuros

Ampliar a investigação prática da distribuição composta α-μ/Gamma, realizando medições em ambientes fisicamente diferenciados.

Dar continuidade ao estudo das estatísticas de primeira e segunda ordem para distribuição α-μ/Gamma obtendo expressões em fórmula fechada para função de distribuição acumulada e para função de autocorrelação, por exemplo.

Obtenção de uma expressão em fórmula fechada para a distribuição composta κ-μ/Gamma e do seu caso particular, Rice/Gamma.

Com a intensão de melhorar o sistema de medição é sugerido:

1. Aumentar a altura da antena de transmissão;
2. Aumentar a potência radiada pelo sistema transmissor;
3. Aumentar a taxa de amostragem do sinal recebido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] GOLDSMITH, A. *Wireless communications.* [S.l.]: Cambridge university press, 2005.

[2] DIAS, U. Distribuição de fase e estatisticas correlacionadas em ambientes sem fio: teoria e validação experimental. Biblioteca Digital da Unicamp, 2010.

[3] PARSONS, J. D. *The Mobile Radio Propagation Channel. Second Edition.* [S.l.]: John Wiley and Sons, Ltd, 2000.

[4] SAUNDERS, S.; ARAGÓN-ZAVALA, A. *Antennas and propagation for wireless communication systems.* [S.l.]: Wiley, 2007.

[5] MISRA, I. *Wireless Communications and Networks: 3G and Beyond.* [S.l.]: Tata McGraw Hill Education, 2009.

[6] KOSTIC, I. Analytical approach to performance analysis for channel subject to shadowing and fading. In: IET. *Communications, IEE Proceedings-.* [S.l.], 2005. v. 152, n. 6, p. 821–827.

[7] ABDI, A.; KAVEH, M. On the utility of gamma pdf in modeling shadow fading (slow fading). In: IEEE. *Vehicular Technology Conference, 1999 IEEE 49th.* [S.l.], 1999. v. 3, p. 2308–2312.

[8] ABDI, A. et al. On the estimation of the k parameter for the rice fading distribution. *Communications Letters, IEEE*, IEEE, v. 5, n. 3, p. 92–94, 2001.

[9] YACOUB, M. D. The α-μ distribution: a general fading distribution. In: IEEE. *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2002. The 13th IEEE International Symposium on.* [S.l.], 2002. v. 2, p. 629–633.

[10] TJHUNG, T.; CHAI, C. Fade statistics in nakagami-lognormal channels. *Communications, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 47, n. 12, p. 1769–1772, 1999.

[11] YACOUB, M. The κ-μ distribution and the η-μ distribution. *Antennas and Propagation Magazine, IEEE*, IEEE, v. 49, n. 1, p. 68–81, 2007.

[12] MALHOTRA, J.; SHARMA, A.; KALER, R. On the performance analyses in composite multipath-shadowed fading wireless channel.

[13] SIMON, M.; ALOUINI, M. *Digital communication over fading channels.* [S.l.]: Wiley-IEEE Press, 2004.

[14] LAOURINE, A. et al. On the performance analysis of composite multipath/shadowing channels using the g-distribution. *Communications, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 57, n. 4, p. 1162–1170, 2009.

[15] ABDI, A.; KAVEH, M. K distribution: An appropriate substitute for rayleigh-lognormal distribution in fading-shadowing wireless channels. *Electronics Letters*, IET, v. 34, n. 9, p. 851–852, 1998.

[16] AGILENT N9912A FieldFox RF Analyzer 2 MHz to 4/6 GHz Data Sheet. Acessado em 16 de Novembro de 2012. Disponível em: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/N9912-90006.pdf>.

[17] MANUAL de Instalação MM-2412o OMNI. Acessado em 16 de Novembro de 2012. Disponível em: <http://www.aquario.com.br/>.

[18] ANTENA Monopolo Vertical Móvel 5/8 de Onda Para Sistemas de Telefonia Celular e Troncalizados. Acessado em 16 de Novembro de 2012. Disponível em: <http://www.arseletronica.com.br/upload/produtos/fichas/445.pdf>.

[19] LOW Noise Amplifier ZHL-1724HLN. Acessado em 16 de Novembro de 2012. Disponível em: <http://www.minicircuits.com/pdfs/ZHL-1724HLN.pdf>.

[20] 8590E/8590L Series Spectrum Analyzer User's Guide. Acessado em 16 de Novembro de 2012. Disponível em: <8590E/8590L Series Spectrum Analyzer User's Guide http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/08590-90301.pdf>.

[21] U12 User's Guide. Acessado em 16 de Novembro de 2012. Disponível em: <http://labjack.com/support/u12/users-guide>.