

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
MESTRADO EM ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES

Eduardo da Silva Leão

Análise Estatística da Variabilidade do Sinal Rádio
Móvel em Ambiente de Vegetação

Niterói-RJ

2012

EDUARDO DA SILVA LEÃO

ANÁLISE ESTATÍSTICA DA VARIABILIDADE DO SINAL RÁDIO MÓVEL EM
AMBIENTE DE VEGETAÇÃO

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre. Área de Concentração: Sistemas de Telecomunicações.

Orientadora: Prof^ª. Dra. LENI JOAQUIM DE MATOS

Niterói-RJ

2012

Ficha Catalográfica elaborada pela Biblioteca da Escola de Engenharia e Instituto de Computação da UFF

L437 Leão, Eduardo da Silva

Análise estatística da variabilidade do sinal rádio móvel medido em ambiente de vegetação / Eduardo da Silva Leão. – Niterói, RJ : [s.n.], 2012.
107 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Telecomunicações) - Universidade Federal Fluminense, 2012.

Orientador: Leni Joaquim de Matos.

1. Canal radiomóvel. 2. Propagação de sinais (Engenharia de Telecomunicações). 3. Efeito da vegetação. I. Título.

CDD 621.38456

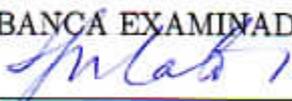
EDUARDO DA SILVA LEÃO

ANÁLISE ESTATÍSTICA DA VARIABILIDADE DO SINAL RÁDIO MÓVEL EM
 AMBIENTE DE VEGETAÇÃO

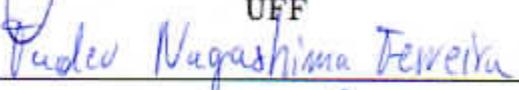
Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre. Área de Concentração: Sistemas de Telecomunicações.

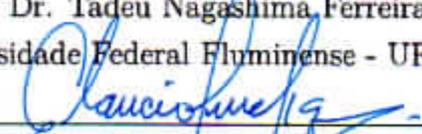
Aprovada em 6 de junho de 2012.

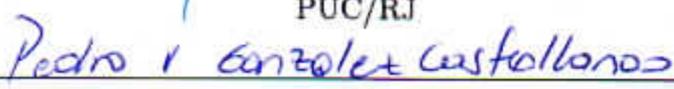
BANCA EXAMINADORA


 Profª. Dra. Leni Joaquim de Matos - Orientadora
 UFF


 Prof. Dr. José Santo Guiscafré Panaro
 UFF


 Prof. Dr. Tadeu Nagashima Ferreira
 Universidade Federal Fluminense - UFF


 Prof. Ph.D. Gláucio Lima Siqueira
 PUC/RJ


 Dr. Pedro Vladimir Gonzalez Castellanos
 Inmetro

Niterói-RJ
 2012

À minha família.

Agradecimentos

À orientadora Prof^ª Dra. Leni Joaquim de Matos pela orientação, atenção e dedicação em todas as fases da elaboração deste trabalho.

Ao Professor Gláucio Lima Siqueira (PUC/RJ) pelo empréstimo de equipamentos utilizados nas medições de campo.

Ao Coordenador da Área de Coleções Vivas, Ricardo Carneiro Reis, e ao Diretor de Ambiente e Tecnologia, Guido Gelli, ambos do Jardim Botânico do Rio de Janeiro, pela disponibilização do ambiente de medições.

Aos colegas do laboratório, em especial, ao Fábio José Barroso da Fonseca, Pedro Armando Vieira, Tiago Francisco Barros Cavalcanti e Wilyam David Torres Meza pela troca de ideias e/ou apoio na realização das medições.

Aos engenheiros André Vinícius Pereira de Rezende e Jones de Queiroz Duarte pelas dicas e ajuda na parte de programação, bem como a Márcio de Oliveira Macedo por sugestões no *set-up* de medições .

Por fim, aos professores e funcionários do curso de Mestrado em Engenharia de Telecomunicações da UFF, pelo ensinamento e ajuda dispensada.

Lista de Figuras

2.1	Ilustração dos fatores que afetam um sinal de comunicações móveis [7] . . .	5
2.2	Multipercursos em um ambiente de comunicação móvel	8
2.3	Ilustração de resposta ao impulso em canal multipercurso [16]	10
2.4	Resposta ao impulso em canal multipercurso estacionário	10
2.5	Ilustração de resposta ao impulso em canal faixa estreita	13
2.6	Geometria para o cálculo do efeito Doppler [18]	14
2.7	Modelo de propagação por espalhamento de Clarke. (a) Componentes de onda incidindo sobre o receptor móvel; (b) Direção (ângulo de azimute) da n-ésima componente de onda [16]	16
2.8	Mapeamento da fração de potência incidente para o espectro de potência do sinal [16]	18
2.9	Espectro Doppler sujeito ao desvanecimento (Antena omnidirecional e ângulo azimute com distribuição uniforme) [16]	20
2.10	Modelo tridimensional de propagação por espalhamento	21
2.11	Densidade de probabilidade da função $f_{\beta}(\beta)$ proposta por Aulin	23
2.12	Comparação entre as densidades espectrais de potência nos modelos de Clarke e Aulin [16]	24
2.13	Variáveis definidas no cálculo da LCR e AFD	26
3.1	Distribuições normal e log-normal	30
3.2	Funções $p(r)$ e $P(r)$ de Rayleigh	32
3.3	Função densidade de probabilidade de Rice: (a) $(K \rightarrow 0)$, (b) $k \cong 1$ e (c) $k \gg 1$	35
4.1	Ilustração do ambiente de medições (Fonte: <i>Google maps</i>)	44
4.2	Visão da rota 1	45

4.3	Visão da rota 2	45
4.4	Visão da rota 3	45
4.5	Visão da rota 4	45
4.6	Visão da rota 5	46
4.7	Visão da rota 6	46
4.8	Visão da rota 7	46
4.9	Diagrama de blocos	48
4.10	Sistema transmissor	48
4.11	Sistema receptor	50
4.12	Antena utilizada nas medições e seu gráfico de VSWR	50
4.13	Curva de calibração do analisador de espectro para frequência de 1,88 GHz	52
4.14	Componentes do sensor de posição	54
5.1	Setor que apresentou o melhor ajuste pelo teste qui-quadrado para cada fdp na rota 1	61
5.2	Setor que apresentou o melhor ajuste pelo teste qui-quadrado para cada fdp na rota 2	63
5.3	Setor que apresentou o melhor ajuste pelo teste qui-quadrado para cada fdp na rota 3	65
5.4	Setor que apresentou o melhor ajuste pelo teste qui-quadrado para cada fdp na rota 4	67
5.5	Setor que apresentou o melhor ajuste pelo teste qui-quadrado para cada fdp na rota 5	69
5.6	Setor que apresentou o melhor ajuste pelo teste qui-quadrado para cada fdp na rota 6	71
5.7	Setor que apresentou o melhor ajuste pelo teste qui-quadrado para cada fdp na rota 7	73
5.8	Resultado da taxa de cruzamento de nível e duração média de desvaneci- mento para um setor da rota 1	79
5.9	Resultado da taxa de cruzamento de nível e duração média de desvaneci- mento para um setor da rota 2	80
5.10	Resultado da taxa de cruzamento de nível e duração média de desvaneci- mento para um setor da rota 3	81

5.11	Resultado da taxa de cruzamento de nível e duração média de desvanecimento para um setor da rota 4	82
5.12	Resultado da taxa de cruzamento de nível e duração média de desvanecimento para um setor da rota 5	83
5.13	Resultado da taxa de cruzamento de nível e duração média de desvanecimento para um setor da rota 6	84
5.14	Resultado da taxa de cruzamento de nível e duração média de desvanecimento para um setor da rota 7	85
5.15	Reta de melhor ajuste e fator de atenuação para a rota 1	87
5.16	Reta de melhor ajuste e fator de atenuação para a rota 2	88
5.17	Reta de melhor ajuste e fator de atenuação para a rota 3	88
5.18	Reta de melhor ajuste e fator de atenuação para a rota 4	89
5.19	Reta de melhor ajuste e fator de atenuação para a rota 5	89
5.20	Reta de melhor ajuste e fator de atenuação para a rota 6	90
5.21	Reta de melhor ajuste e fator de atenuação para a rota 7	90
5.22	Ajuste do desvanecimento de larga escala na rota 1	92
5.23	Ajuste do desvanecimento de larga escala na rota 2	93
5.24	Ajuste do desvanecimento de larga escala na rota 3	94
5.25	Ajuste do desvanecimento de larga escala na rota 4	95
5.26	Ajuste do desvanecimento de larga escala na rota 5	96
5.27	Ajuste do desvanecimento de larga escala na rota 6	97
5.28	Ajuste do desvanecimento de larga escala na rota 7	98

Lista de Tabelas

2.1	Valores do coeficiente de perda no percurso para diferentes ambientes . . .	6
5.1	Resumo dos valores encontrados para a rota 1	62
5.2	Resumo dos valores encontrados para a rota 2	64
5.3	Resumo dos valores encontrados para a rota 3	66
5.4	Resumo dos valores encontrados para a rota 4	68
5.5	Resumo dos valores encontrados para a rota 5	70
5.6	Resumo dos valores encontrados para a rota 6	72
5.7	Resumo dos valores encontrados para a rota 7	74
5.8	Valores do teste qui-quadrado para cada fdp em cada setor da rota 4 . . .	76
5.9	Características das rotas sondadas, resultado do teste χ^2 para o desvaneci- mento de larga escala	99
6.1	Resumo dos resultados para cada rota do ambiente sondado	101
A.1	Valores do teste qui-quadrado para cada fdp em cada setor da rota 1 . . .	110
A.2	Valores do teste qui-quadrado para cada fdp em cada setor da rota 2 . . .	111
A.3	Valores do teste qui-quadrado para cada fdp em cada setor da rota 3 . . .	112
A.4	Valores do teste qui-quadrado para cada fdp em cada setor da rota 5 . . .	113
A.5	Valores do teste qui-quadrado para cada fdp em cada setor da rota 6 . . .	114
A.6	Valores do teste qui-quadrado para cada fdp em cada setor da rota 7 . . .	115

Sumário

Agradecimentos	iv
Lista de Figuras	vii
Lista de Tabelas	viii
Resumo	xii
Abstract	xiii
1 Introdução	1
1.1 Objetivos e Contribuições do Trabalho	2
1.2 Estrutura da Dissertação	3
2 Características do Canal Rádio Móvel	4
2.1 Introdução	4
2.2 Perda no Percurso (<i>Path Loss</i>)	5
2.3 Desvanecimento de Larga Escala (<i>Large Scale Fading</i>)	7
2.4 Desvanecimento de Pequena Escala (<i>Small Scale Fading</i>)	8
2.5 O Canal Rádio Móvel	8
2.6 Canal Faixa Larga	9
2.6.1 Retardo Médio	11
2.6.2 Espalhamento de Retardo (<i>Delay Spread</i>)	11
2.6.3 Banda de Coerência	12
2.7 Canal Faixa Estreita	13
2.7.1 Espalhamento Doppler	14
2.7.1.1 Modelo de Clarke	15

2.7.1.2	Modelo de Aulin	20
2.7.2	Tempo de Coerência	24
2.7.3	Taxa de Cruzamento de Nível	25
2.7.4	Duração Média de Desvanecimento	26
2.8	Sumário	27
3	Análise Estatística do Sinal	28
3.1	Introdução	28
3.2	Distribuição Normal	29
3.3	Distribuição Rayleigh	31
3.3.1	Taxa de Cruzamento de Nível Rayleigh	32
3.3.2	Duração Média de Desvanecimento Rayleigh	33
3.4	Distribuição Rice	33
3.4.1	Taxa de Cruzamento de Nível Rice	35
3.4.2	Duração Média de Desvanecimento Rice	35
3.5	Distribuição Nakagami-m	35
3.5.1	Taxa de Cruzamento de Nível Nakagami-m	37
3.5.2	Duração Média de Desvanecimento Nakagami-m	37
3.6	Distribuição $\alpha - \mu$	38
3.6.1	Taxa de Cruzamento de Nível $\alpha - \mu$	39
3.6.2	Duração Média de Desvanecimento $\alpha - \mu$	40
3.7	Sumário	40
4	Ambiente e <i>Set-up</i> de Medições	41
4.1	Introdução	41
4.2	Procedimentos de Medições	41
4.2.1	Definição da Taxa de Amostragem do Sinal Recebido	41
4.3	Ambiente Sondado	43
4.4	<i>Set-up</i> de Medições	47
4.4.1	Bloco Transmissor	48
4.4.1.1	Gerador de Sinais	49
4.4.1.2	Amplificador de Potência	49
4.4.1.3	Antena	49

	xi
4.4.2 Bloco Receptor	49
4.4.2.1 Antena	50
4.4.2.2 Amplificador de Baixo Ruído	50
4.4.2.3 Analisador de Espectro	51
4.4.3 Bloco de Aquisição e Armazenamento	52
4.4.3.1 Sensor de Posição	53
4.4.3.2 Placa de Aquisição	54
4.5 Alimentação dos Blocos de Recepção, Aquisição e Armazenamento	55
4.6 Sumário	55
5 Resultados	57
5.1 Preparação dos Dados	57
5.2 Análise da Variabilidade de Pequena Escala do Sinal	59
5.3 Cálculo da Taxa de Cruzamento de Nível e Duração Média de Desvanecimento	78
5.4 Análise da Variabilidade de Larga Escala do Sinal	86
5.5 Sumário	99
6 Conclusão	100
6.1 Sugestões para Trabalhos Futuros	102
Referências Bibliográficas	103
A Tabelas com Resultados	109

Resumo

Esta dissertação possui como objetivo apresentar a influência da vegetação nos sinais rádio móveis em área urbana, através da caracterização em faixa estreita do canal realizada nos dados obtidos de medições no Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Primeiramente, é apresentado um embasamento teórico sobre o tema. Depois, são fornecidos todos os detalhes acerca do ambiente e do *set-up* de medição, bem como os procedimentos para a realização e a coleta dos dados medidos, seguindo com o processamento dos mesmos. Com os resultados, é realizada uma análise qualitativa e quantitativa, esta última efetuada através do teste de aderência ao método Qui-quadrado, definindo-se quais das funções densidade de probabilidade - Rayleigh, Rice, Gauss, Nakagami-m e $\alpha - \mu$ melhor se ajustam às medições para cada uma das rotas do ambiente sondado. Também foram calculados o fator de atenuação e as estatísticas de segunda ordem, como taxa de cruzamento de nível e a duração média de desvanecimento.

Palavras-chave: Canal rádio móvel, propagação em vegetação, desvanecimento de sinal, variabilidade de sinal.

Abstract

This dissertation has as objective to present the influence of vegetation on the mobile radio signals in urban area, through the characterization in narrow band performed on the data obtained from measurements picked up at the Botanical Garden of Rio de Janeiro. Firstly, a theoretical background is presented about the topic. After, all details are provided about the environment and the *set-up* measurement, as well as the procedures for making and collecting the measured data, with the following processing. With the results, a qualitative and quantitative analysis is provided, the latter performed by testing for adherence to the Chi-square method, defining which of the probability density functions - Rayleigh, Rice, Gaussian, Nakagami-m and $\alpha - \mu$ best fit to the measurements for each of the routes of the environment studied. The attenuation factor has been calculated and the second-order statistics, such as level crossing rate and average fade duration.

Keywords: Mobile radio channel, propagation in vegetation, signal fading, signal variability.

Capítulo 1

Introdução

Os sistemas de comunicações móveis que operam em frequências na banda de UHF (300 MHz - 3 GHz) já fazem parte do cotidiano de milhões de pessoas e representam um papel importante para o desenvolvimento econômico e social de um país, fato este propiciado, basicamente, pelo desenvolvimento de tecnologias que permitem a mobilidade dos terminais de comunicação ocorrido nas últimas décadas, tendo como principal exemplo o sistema móvel celular ou, simplesmente, sistema móvel pessoal.

Com a mobilidade e a rápida evolução destes sistemas, que oferecem uma ampla variedade de serviços, integrando áudio, vídeo e dados, são necessárias altas taxas de transmissão e, conseqüentemente, maiores são as restrições para o seu funcionamento.

Desse modo, o estudo detalhado das características de propagação do sinal rádio móvel se torna um fator primordial, principalmente através de dados experimentais, pois, muito embora o resultado destas características possam ser obtidas mediante simulação, somente por meio de dados experimentais é possível validar um modelo físico. No entanto, talvez pela dificuldade de realização dos experimentos, os trabalhos que apresentam resultados experimentais são minoria na literatura [1].

A fim de prever, simular e desenvolver sistemas de comunicações móveis de alto desempenho, características precisas de propagação do ambiente precisam ser conhecidas. Um destes meios é o ambiente com vegetação. A presença de folhagem ao longo do caminho entre o transmissor e o receptor móvel causa a degradação do sinal. Isto porque, espalhadores, tais como as folhas distribuídas aleatoriamente, galhos, ramos e troncos de árvores podem causar atenuação, espalhamento, difração e absorção das ondas eletromagnéticas. Isto irá restringir, severamente, a concepção de sistemas de comunicação e,

portanto, tem sido de interesse de pesquisadores, visto que os centros urbanos cada vez mais apresentam parques para amenizar o ambiente.

Desde a década de 1960, a propagação de ondas de rádio em ambiente de vegetação tem sido objeto de intensa pesquisa [2, 3, 4, 5]. Tanto trabalhos analíticos como empíricos sobre a modelagem e caracterização do canal rádio móvel em ambiente de vegetação têm sido realizados. Alguns resultados significativos e análises são relatados em [6]. Existem muitos fatores externos que causam a variação da propagação das ondas de rádio e até mesmo o colapso total do enlace de comunicação no ambiente de vegetação.

Nesse contexto, este trabalho visa agregar mais informação sobre o tema, através da análise da propagação das ondas de rádio em ambiente com vegetação, em parque urbano, com foco na caracterização dos desvanecimentos de larga escala e de pequena escala do sinal e futura modelagem do canal.

1.1 Objetivos e Contribuições do Trabalho

Esta dissertação tem como proposta analisar a variabilidade do sinal rádio móvel em um ambiente de vegetação, de forma a caracterizar as variações de grande escala e de pequena escala, e contribuindo, assim, para o aprimoramento da caracterização do canal rádio móvel em um ambiente de vegetação.

Nesse sentido as seguintes contribuições são propostas:

- técnica de medição, onde será apresentado todo o aparato necessário para a realização das medições de campo, desde a montagem dos blocos receptor, transmissor e de aquisição e armazenamento, passando pelas configurações e ajustes que precisam ser feitos em cada equipamento utilizado, na escolha das rotas a serem percorridas no interior do Jardim Botânico, na velocidade de deslocamento do receptor durante a realização das medições, na taxa de amostragem dos dados coletados e na montagem de cada bloco do *set-up* de medições;
- obtenção da distribuição de probabilidade que caracteriza as variações de grande escala e de pequena escala, para a modelagem do desvanecimento de longo e de curto prazo, respectivamente;
- cálculo da taxa de cruzamento de nível e da duração média de desvanecimento;

- obtenção do fator de atenuação no ambiente sondado; e
- resultados qualitativos, exibidos na forma gráfica, e quantitativos obtidos através de tabelas contendo os valores do teste do qui-quadrado para todas as distribuições pesquisadas permitindo, assim, ser avaliada de forma precisa a diferença entre os ajustes de cada distribuição.

1.2 Estrutura da Dissertação

Os demais capítulos desta dissertação estão estruturados da seguinte forma:

- Capítulo 2: Descrição das características do canal de propagação rádio móvel;
- Capítulo 3: Descrição das distribuições de probabilidades que serão usadas na análise estatística do sinal rádio móvel, com seus respectivos históricos;
- Capítulo 4: Descrição do ambiente e *set-up* de medições, assim como os procedimentos para a realização e a obtenção da coleta dos dados medidos;
- Capítulo 5: Análise dos dados contendo as estatísticas de primeira ordem (função densidade de probabilidade) e de segunda ordem (taxa de cruzamento de nível e duração média de desvanecimento); e
- Capítulo 6: Conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Características do Canal Rádio Móvel

2.1 Introdução

Em um sistema de comunicação móvel existem alguns fatores que afetam diretamente a qualidade do sinal recebido. A intensidade do sinal sofre frequentes flutuações, ora proporcionando um sinal de boa qualidade, ora degradando o sinal. A combinação de três efeitos, afetam diretamente o sinal. São eles: a perda no percurso, o desvanecimento lento e o desvanecimento rápido.

Nesse contexto, torna-se necessário conhecer estes fatores que degradam a qualidade do sinal rádio móvel, de forma que se possa compreender como cada fator afeta o sinal recebido pelo receptor móvel.

Embora em um sinal real a perda no percurso e os desvanecimentos lento e rápido estejam agrupados, é possível desmembrar cada fator e analisá-los separadamente. O conhecimento adequado destes fatores é de suma importância para a implementação de um sistema de comunicação rádio móvel, assim como para o desenvolvimento de equipamentos. A Figura 2.1 ilustra de forma segmentada estes três fatores que afetam o sinal.

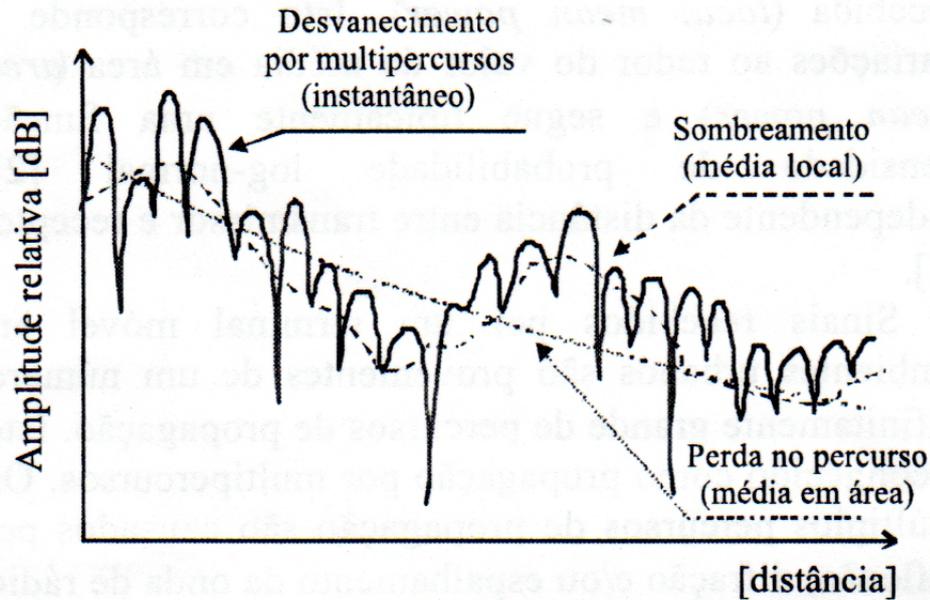


Figura 2.1: Ilustração dos fatores que afetam um sinal de comunicações móveis [7]

Na figura 2.1 é possível verificar que o sinal recebido é composto por três termos, um referente às flutuações rápidas do sinal, causado por desvanecimentos de pequena escala, este associado ao fenômeno de multipercurso, e outro referente a uma variação mais suave e lenta, que reflete o desvanecimento de grande escala do sinal, sendo este associado ao sombreamento por obstáculos. Aliado a estes dois, há, ainda, a queda do nível do sinal com a distância, denominado, perda no percurso.

2.2 Perda no Percurso (*Path Loss*)

A perda no percurso ou perda de propagação está relacionada ao cálculo da intensidade média do sinal recebido, sendo causada pela atenuação do sinal devido à distância entre o transmissor e o receptor, crescendo com a distância d , na forma d^n , onde n é o coeficiente de perda no percurso, que varia conforme o ambiente, e estando, em geral, na faixa entre 2 e 6. A tabela 2.2 apresenta valores do coeficiente de perda no percurso n para vários tipos de ambientes [8].

Tabela 2.1: Valores do coeficiente de perda no percurso para diferentes ambientes

Tipo de Ambiente	Coeficiente de Perda (n)
Espaço Livre	2
Áreas urbanas	2,7 a 3,5
Áreas urbanas com sombreamento	3 a 5
<i>Indoor</i> com linha de visada	1,6 a 1,8
<i>Indoor</i> sem linha de visada	4 a 6

Todos os modelos de predição de atenuação com a distância, sejam eles teóricos ou empíricos, indicam que a potência média do sinal decresce linearmente com o logaritmo da distância, tanto para ambientes internos (*indoor*) como externos (*outdoor*). A forma mais simples de determinar a perda no percurso do sinal ao longo da distância é considerar o modelo teórico de propagação no espaço livre, onde se admite que a região entre o transmissor e o receptor está livre de obstáculos que refletem ou absorvem o sinal de rádio, assim como se considera que a atmosfera é um meio uniforme, que não absorve potência do sinal. A perda de propagação média no espaço livre pode ser expressa por:

$$\overline{PL}(d)_{[dB]} = \overline{PL}(d_0)_{[dB]} + 10n \log \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad (2.1)$$

onde:

d_0 - distância de referência próxima ao transmissor;

d - distância entre o transmissor e o receptor; e

n - coeficiente de perda no percurso.

Além do modelo de propagação no espaço livre, existem outros modelos teóricos, como o modelo de Terreno Plano e o modelo de Difração, assim como métodos empíricos, dentre os quais se pode destacar, o Método de Erceg [9], de Okumura [10], de Hata [11], de Lee [12], de Ibrahim e Parsons [13] e de Walfish e Bertoni [14].

2.3 Desvanecimento de Larga Escala (*Large Scale Fading*)

O desvanecimento de larga escala está relacionado às características de propagação que manifestam efeitos no sinal ao longo de grandes distâncias, comparadas com o comprimento de onda do sinal transmitido. Este tipo de desvanecimento é também conhecido por sombreamento, pois ele está mais relacionado a obstruções naturais, como o relevo do terreno, e às edificações, fazendo com que o receptor fique em uma região de sombra eletromagnética (ou de nível de sinal bastante reduzido) quando há obstrução.

O modelo descrito pela equação 2.1 para a perda no percurso não leva em consideração o fato de que a disposição dos obstáculos nas redondezas de um ambiente, em geral, são diferentes para duas posições distintas em uma mesma distância d do transmissor. Este fato faz com que medidas realizadas em campo sejam bastante diferentes daquelas previstas pelo modelo anterior. As medidas mostram na realidade, que para qualquer valor de d , a atenuação total $PL(d)$, para uma localização particular, é uma variável aleatória com distribuição log-normal (normal em dB) sobre a média, dada por:

$$PL(d)_{[dB]} = \overline{PL}(d) + X_\sigma = \overline{PL}(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma \quad (2.2)$$

onde:

X_σ - variável aleatória de média zero e desvio padrão σ .

Assim, pode-se calcular a potência recebida a partir da potência transmitida, sendo dada por:

$$P_{R_x}(d)_{[dBm]} = P_{T_x}(d)_{[dBm]} - PL(d)_{[dB]} \quad (2.3)$$

A distância de referência d_0 , o coeficiente de perda no percurso n e o desvio padrão σ descrevem, estatisticamente, o modelo de atenuação para uma distância arbitrária d do transmissor. A distância de referência d_0 deve ser escolhida de modo que $\overline{PL}(d_0)$ possa ser calculada assumindo, por simplicidade, o modelo de propagação do espaço livre.

2.4 Desvanecimento de Pequena Escala (*Small Scale Fading*)

O desvanecimento de pequena escala é causado pelas variações bruscas e profundas do nível do sinal recebido. Essa variação é decorrência da multiplicidade de percursos que chegam ao receptor, com diferentes amplitudes e defasadas entre si, através de mecanismos de propagação como reflexão, difração e espalhamento, onde os multipercursos provenientes dos espalhadores situados num raio de 100 comprimentos de onda do receptor são os que mais fortemente influem no sinal recebido [12]. Os desvanecimentos profundos na intensidade do sinal são da ordem de algumas dezenas de decibéis em relação ao seu valor eficaz e ocorrem a, aproximadamente, meio comprimento de onda. A figura 2.2 ilustra multipercursos que chegam em um receptor móvel a partir dos mecanismos de reflexão e difração.

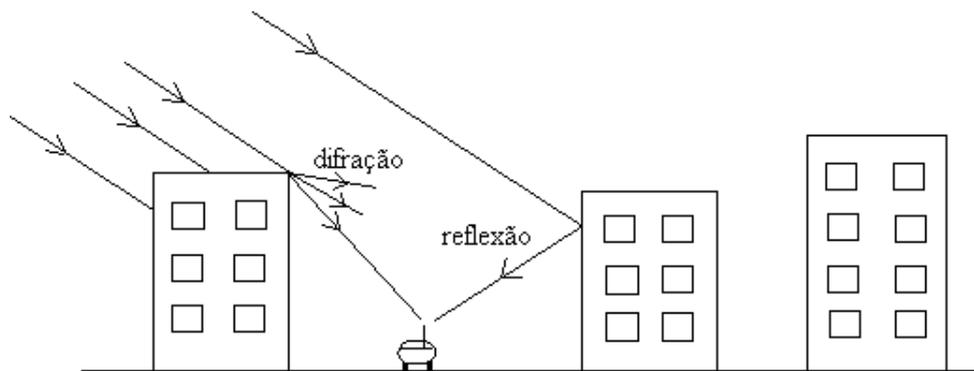


Figura 2.2: Multipercursos em um ambiente de comunicação móvel

2.5 O Canal Rádio Móvel

Em um canal rádio móvel o movimento relativo entre transmissor e receptor e/ou dos espalhadores encontrados no ambiente entre o transmissor e o receptor provocam o fenômeno do multipercurso do sinal transmitido, fazendo com que o sinal tenha tanto dispersão no tempo quanto na frequência. No caso de um sinal faixa larga, os multipercursos resultarão em réplicas atenuadas do sinal transmitido que chegam ao móvel com diferentes retardos, causando a dispersão temporal do sinal, onde esta dispersão temporal pode ser quantificada através de parâmetros como retardo médio, espalhamento de retardo e banda de coerência.

No caso de um sinal faixa estreita, os parâmetros obtidos pela sondagem do canal diferem dos obtidos em uma sondagem faixa larga. Neste caso, a mobilidade do meio e/ou da estação receptora, associada à variação dos ângulos de chegada dos multipercursos, que provoca o efeito Doppler, resulta na dispersão do sinal na frequência, e pode ser caracterizada pelos parâmetros de espalhamento Doppler e tempo de coerência. Além destes, também se pode obter a taxa de cruzamento de nível e a duração média de desvanecimento.

Matos em [15], através do desenvolvimento e implementação de uma técnica de sondagem em faixa larga apropriada, fez o estudo da influência da vegetação na dispersão dos sinais rádio móveis, onde realizou as suas medições exatamente na mesma frequência e ambiente considerados neste trabalho. De certa forma, este trabalho complementa os estudos realizados por Matos em um ambiente de vegetação, onde se tem uma caracterização completa do canal, tanto em faixa larga como em faixa estreita.

2.6 Canal Faixa Larga

Em um ambiente de propagação, um impulso único transmitido por uma fonte transmissora resultará em múltiplas réplicas que chegam em diferentes instantes ao receptor e podem ser diretamente relacionadas à resposta ao impulso do canal, sendo esta resposta ao impulso uma caracterização do canal faixa larga. Desse modo, o canal rádio móvel pode ser visto como um sistema linear que transfere os sinais da entrada para a saída, de forma análoga a um filtro linear.

Sabendo que o sinal recebido em um canal multipercurso consiste numa série de réplicas atenuadas, atrasadas e defasadas do sinal original, a resposta impulsiva em banda base de um canal multipercurso pode ser expressa pela equação (2.4):

$$h_b(t, \tau) = \sum_{i=0}^{N-1} a_i(t, \tau) \exp [j (2\pi f_c \tau_i(t) + \phi_i(t, \tau))] \delta(\tau - \tau_i(t)) \quad (2.4)$$

onde $a_i(t, \tau)$ e $\tau_i(t)$ são, respectivamente, as amplitudes reais e os atrasos da i -ésima componente do multipercurso no instante t . O termo $(2\pi f_c \tau_i(t) + \phi_i(t, \tau))$ representa o deslocamento de fase devido à propagação no espaço livre da i -ésima componente. A figura 2.3 ilustra um exemplo de uma possível resposta ao impulso de uma canal faixa larga na presença de multipercurso.

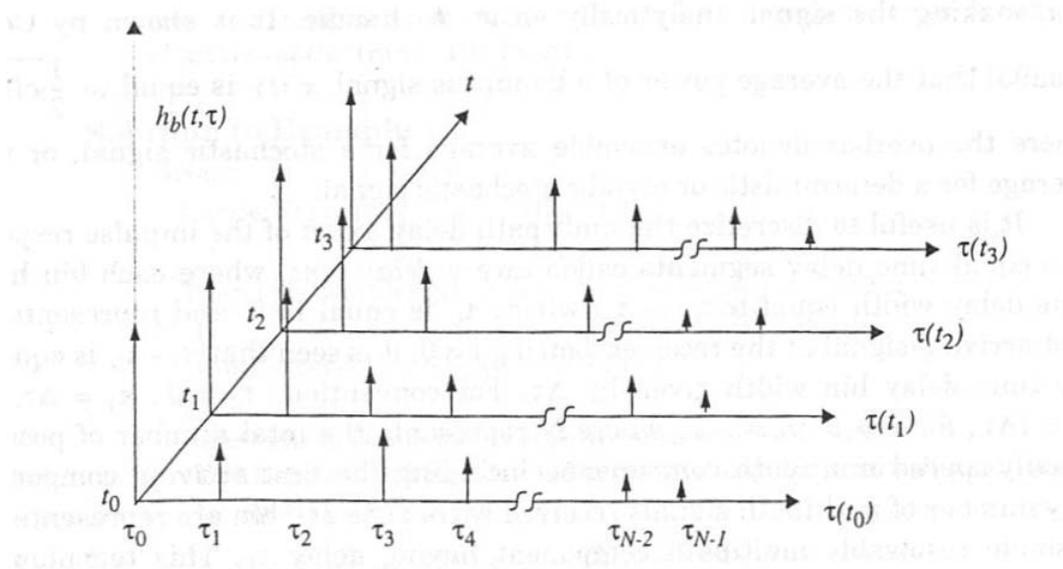


Figura 2.3: Ilustração de resposta ao impulso em canal multipercurso [16]

Ao se considerar o canal estacionário no sentido amplo no domínio do tempo e com espalhamento decorrelacionado no domínio de retardo τ , ou seja, canal WSSUS (*Wide-Sense Stationary Uncorrelated Scatering*), a resposta ao impulso do canal pode ser simplificada e será dada por:

$$h_b(t, \tau) = \sum_{i=0}^N a_i \exp(-j\theta_i) \delta(\tau - \tau_i) \quad (2.5)$$

A figura 2.4 ilustra um exemplo da resposta impulsiva simplificada, dada pela equação (2.5).

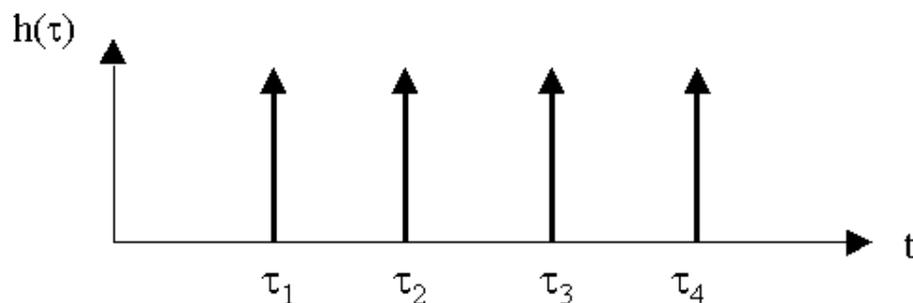


Figura 2.4: Resposta ao impulso em canal multipercurso estacionário

A predição de $h_b(t)$ é feita utilizando-se um pulso de teste $p(t)$ que aproxime a função delta de Dirac no transmissor, ou seja, $p(t) \cong \delta(t - \tau)$. A este processo de

aproximação para a resposta ao impulso do canal é chamado de sondagem do canal, enquanto a resposta obtida é denominada perfil de retardos.

O perfil de retardos ou perfil de potência de retardos fornece a intensidade do sinal recebido em um canal multipercurso em função do intervalo de retardo. O intervalo de retardo é a diferença de tempo entre os multipercursos. Esse dado é facilmente medido, empiricamente, e pode ser usado para extrair parâmetros, tais como retardo médio, espalhamento de retardo e banda de coerência.

2.6.1 Retardo Médio

É o tempo médio de ocorrência entre as réplicas de multipercursos que chegam ao receptor, oriundas do transmissor num instante t . O retardo médio é definido pela média ponderada dos retardos. Para um sistema de aquisição discreto, o retardo médio pode ser expresso, matematicamente, por:

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_{i=0}^N \tau_i P(\tau_i)}{\sum_{i=0}^N P(\tau_i)} \quad (2.6)$$

Na equação (2.6) N é o número de picos de correlação existentes dentro do perfil de potência de retardos ($P(\tau_i)$), associados ao multipercurso.

2.6.2 Espalhamento de Retardo (*Delay Spread*)

É o desvio padrão eficaz σ_τ do retardo médio e representa o valor efetivo da dispersão, no tempo, de um sinal transmitido. É também chamado de retardo eficaz, e para um sistema de aquisição discreto, é definido por:

$$\sigma_\tau = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^N (\tau_i - \bar{\tau})^2 P(\tau_i)}{\sum_{i=0}^N P(\tau_i)}} \quad (2.7)$$

O conhecimento do espalhamento de retardo de um ambiente permite que se adote uma taxa de transmissão digital apropriada para o sistema, prevenindo a interferência

inter simbólica e evitando o uso de equalizadores. O intervalo entre dois *bits* deve ser maior que o *delay spread*, de forma que se tenha uma comunicação digital confiável sobre o canal. Valores típicos de *delay spread* são de alguns microssegundos em áreas urbanas e frações de microssegundos em áreas suburbanas e abertas. Salienta-se que para o cálculo do espalhamento de retardo, não há a necessidade da informação de fase do sinal recebido, sendo necessário somente a informação de amplitude.

2.6.3 Banda de Coerência

É o intervalo de frequências dentro do qual a resposta em frequência do canal pode ser considerada aproximadamente plana, com ganho constante e fase linear. Alternativamente, pode-se interpretar a banda de coerência como a faixa de frequência do canal na qual componentes de frequência são altamente correlacionadas.

A forma de definição da banda de coerência não é única, sendo apenas um critério a ser escolhido. Tipicamente tal correlação é tomada superior a 90%. A banda de coerência B_c costuma ser expressa pela equação (2.8) [17]:

$$B_c \cong \frac{1}{50\sigma_\tau} \quad (2.8)$$

onde:

σ_τ - espalhamento temporal rms, do inglês *root-mean square* ou espalhamento temporal eficaz.

Por outro lado, caso seja considerada uma correlação superior a 50%, a banda de coerência pode ser expressa pela equação (2.9) [17]:

$$B_c \cong \frac{1}{5\sigma_\tau} \quad (2.9)$$

É importante destacar que as equações (2.8) e (2.9) foram obtidas de forma empírica e nem sempre são observadas na prática, tendo sido citadas apenas para ilustração, da variação na banda de coerência, conforme a correlação estipulada e, ainda, da variação inversa com o espalhamento de retardo.

A banda de coerência é um parâmetro que está intimamente relacionado com a questão da seletividade. Por exemplo, se o canal possui ganho constante e fase linear em

uma faixa de frequência (B_c) maior do que a largura de banda do sinal (B_S) a ser transmitido, este sinal ao atravessar o canal sofrerá um desvanecimento plano. Por outro lado, caso o canal possua ganho constante e fase linear em uma faixa de frequência (B_c) menor do que a largura de banda do sinal (B_S) a ser transmitido, este sinal ao atravessar o canal sofrerá um desvanecimento seletivo. Dessa forma, a banda de coerência do canal limita a faixa do sinal a ser transmitido através dele, pois representa a faixa de frequências sobre a qual o canal responde de forma homogênea. Seu conhecimento é utilizado também para estabelecer o espaçamento mínimo entre duas frequências ($\Delta f > B_c$) a serem empregadas em um sistema que adote diversidade em frequência.

2.7 Canal Faixa Estreita

Em um canal faixa estreita, é possível analisar a flutuação do nível do sinal recebido em um sistema de comunicação rádio móvel considerando apenas a sua portadora. Embora o sinal real envolva outros processos, como a modulação, que leva o sinal a ser composto por um grupo de frequências que determina uma largura de faixa de transmissão, em geral, as frequências são próximas entre si, e a largura de faixa deve ser muito menor do que a frequência da portadora.

Sendo um sinal faixa estreita, a estatística de retardos descrita na seção anterior passa a ser desprezível, já que a largura de banda do sinal é menor que a banda de coerência do canal ($B_S < B_c$) e a resposta impulsiva do canal pode ser simplificada. A figura 2.5 ilustra a situação da resposta impulsiva do canal em faixa estreita. Nesse caso, apenas o fenômeno de dispersão na frequência (seletividade no tempo) devido ao efeito Doppler se manifesta.

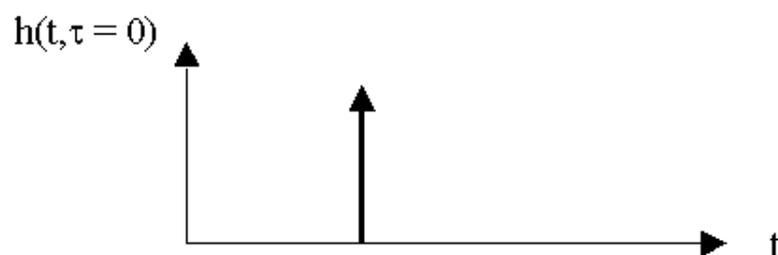


Figura 2.5: Ilustração de resposta ao impulso em canal faixa estreita

2.7.1 Espalhamento Doppler

A percepção no receptor de uma frequência diferente daquela que está sendo transmitida, causada pelo movimento relativo entre o transmissor e o receptor é chamado de desvio Doppler. Pode-se deduzir o valor do desvio Doppler, em função da velocidade de movimento, através de uma abordagem relativística [19] ou por simples geometria [17].

O fenômeno do desvio Doppler poder ser compreendido através do auxílio da figura 2.6, onde se supõe que os raios cheguem ao receptor vindo do espalhador S (*scatter*) horizontalmente, com ângulo de elevação nulo, portanto uma situação bidimensional.

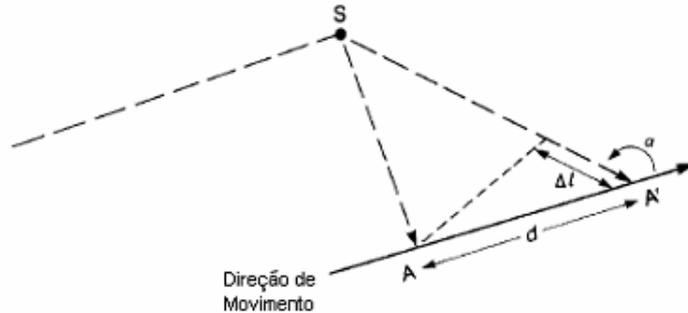


Figura 2.6: Geometria para o cálculo do efeito Doppler [18]

O receptor móvel se encontra, inicialmente no ponto A e, seja o segmento AA' o percurso incremental (Δl) do mesmo se deslocando com uma velocidade v . A variação incremental no percurso AA' da onda será dada pela equação (2.10):

$$\Delta l \cong d \cos(180 - \alpha) = -d \cos(\alpha) \quad (2.10)$$

como

$$d = v\Delta t \quad (2.11)$$

e a variação de fase da onda é dada por:

$$\Delta\phi = -k\Delta l = kv\Delta t \cos(\alpha) = \frac{2\pi}{\lambda}v\Delta t \cos(\alpha) \quad (2.12)$$

Assim, a variação de frequência percebida pelo receptor e correspondente a essa alteração na fase é dada por:

$$\Delta f = \frac{\Delta \text{ciclos}}{\Delta t} = \frac{\Delta \phi}{2\pi} \frac{1}{\Delta t} \quad (2.13)$$

Substituindo a equação (2.12) na equação (2.13), chega-se à equação (2.14):

$$\Delta f = f_D \cong \frac{v}{\lambda} \cos(\alpha) \quad (2.14)$$

onde:

f_D - é a frequência Doppler ou desvio Doppler.

Analisando a equação (2.14), percebe-se que se o móvel se deslocar em direção à fonte da onda ($0 < \alpha < 90^\circ$), o desvio Doppler é positivo, isto é, a frequência recebida aumenta. Caso o móvel se desloque de forma a se afastar da fonte ($90^\circ < \alpha < 180^\circ$), o desvio Doppler será negativo, isto é, a frequência aparente na recepção diminuirá. Os valores extremos do desvio Doppler ocorrem, nas proximidades da frequência da portadora, para $\alpha = 0$ e $\alpha = 180^\circ$.

O sinal recebido é proveniente de várias direções e as características das estruturas variam conforme a posição do receptor móvel. Nesse caso, cada sinal de multipercurso sofrerá diferente desvio Doppler, resultando não mais em um desvio e sim, em um espectro. A este espectro denomina-se espalhamento Doppler ou espectro Doppler, sendo formado a partir da variação aleatória da frequência percebida em cada multipercurso, conforme a variação das estruturas ao redor do receptor, dando origem ao que é denominado Ruído de FM Aleatório (*Random FM Noise*). O ruído de FM aleatório é responsável pela existência de um patamar mínimo para a probabilidade de erro de *bit*, em sistemas de comunicação móvel digital. Esse patamar não pode ser reduzido mesmo com o aumento da potência de transmissão [19].

Na literatura, encontram-se alguns modelos utilizados para caracterizar o espalhamento Doppler, dentre os quais, destacam-se os seguintes:

- Modelo de Clarke; e
- Modelo de Aulin.

2.7.1.1 Modelo de Clarke

O modelo de Clarke tem sido amplamente aceito no meio científico, sendo capaz

de expressar, matematicamente, os efeitos que o sinal sofre ao se propagar por um canal de comunicação com desvanecimento. A Figura 2.7 ilustra o modelo bidimensional de propagação por espalhamento de Clarke, onde o plano xy é o plano horizontal.

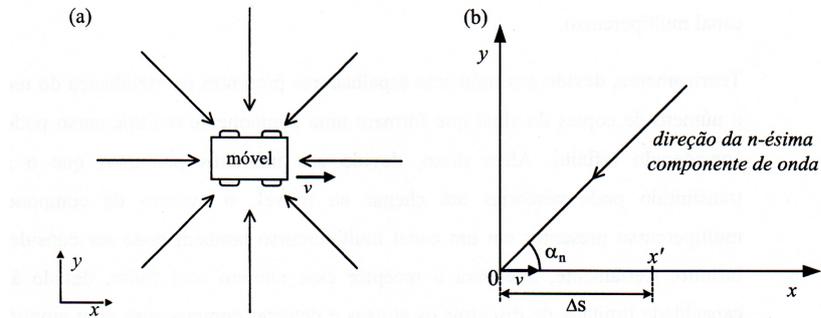


Figura 2.7: Modelo de propagação por espalhamento de Clarke. (a) Componentes de onda incidindo sobre o receptor móvel; (b) Direção (ângulo de azimute) da n -ésima componente de onda [16]

O sinal recebido em qualquer ponto no espaço é composto pela superposição de M ondas planas [20] oriundas do espalhamento sofrido pelo sinal na vizinhança do receptor. Seja a n -ésima onda incidindo sobre o receptor no ponto $(x=0, y=0)$ com azimute α_n , amplitude A_n e fase ϕ_n . O sinal total recebido em banda base será dado por:

$$c = E_0 \sum_{n=1}^M A_n e^{j\phi_n} \quad (2.15)$$

onde:

E_0 - amplitude do sinal transmitido.

As fases ϕ_n são supostas uniformemente distribuídas no intervalo $[0, 2\pi]$, além de serem independentes entre si e dos ângulos de chegada α_n . Teoricamente, infinitas ondas ($M \rightarrow \infty$) chegam ao receptor num determinado ponto.

Em outro ponto, distante Δs do ponto inicial na direção do eixo x , a fase da n -ésima componente de onda não será mais ϕ_n , mas sim $[\phi_n + (2\pi/\lambda)\Delta s \cos \alpha_n]$ [20]. Se o receptor estiver em movimento com uma velocidade constante v e percorrer o espaço Δs em um intervalo $\Delta t = t - t_i$, com $t_i = 0$ (tempo de referência), então a fase da n -ésima componente será dada por $(\phi_n + 2\pi f_m \cos \alpha_n)$.

Reescrevendo a equação (2.15) como função do tempo, tem-se a equação (2.16):

$$c(t) = E_0 \sum_{n=1}^M A_n e^{j\omega_n t + \phi} \quad (2.16)$$

A equação (2.16) representa o modelo matemático do espectro de Clarke, onde A_n foi considerada constante e igual para todas as componentes de onda.

Para chegar ao mesmo resultado, Jakes [21] considerou o sinal transmitido dado pela equação (2.17):

$$r(t) = E_0 \cos(\omega_c t) \quad (2.17)$$

A n-ésima cópia desse sinal ao incidir sobre o móvel terá sofrido um desvio Doppler ω_n relativo ao movimento do móvel, bem como uma atenuação A_n e um atraso τ_n , podendo ser representada pela equação (2.18):

$$r(t) = E_0 A_n \cos((\omega_c + \omega_n)(t - \tau_n)) \quad (2.18)$$

Admitindo M cópias do sinal incidindo sobre o receptor móvel, o sinal total recebido pode ser escrito como:

$$r(t) = E_0 \sum_{n=1}^M A_n \cos(\omega_c t + \omega_n t + \phi_n) \quad (2.19)$$

onde:

$$\phi_n = -(\omega_c + \omega_n)\tau_n$$

Note que $r(t)$ é caracterizado por três variáveis aleatórias, A_n , ω_n e ϕ_n , que são consideradas independentes pela própria natureza física do fenômeno de desvanecimento [22].

O sinal recebido pode ser reescrito através da equação (2.20):

$$r(t) = \text{Re}\{c(t)e^{j\omega_c t}\} \quad (2.20)$$

onde:

$$c(t) = E_0 \sum_{n=1}^M A_n e^{j(\omega_n t + \phi_n)} \quad (2.21)$$

Percebe-se que este é o mesmo resultado obtido por Clarke, conforme se visualiza através da equação (2.16).

A densidade espectral de potência $S_p(f)$ de um sinal desvanecido consiste de um conjunto de linhas espectrais (uma para cada onda incidente) ocorrendo na faixa do desvio Doppler, ou seja, $f_c \pm f_m$. Quando o número de ondas tende ao infinito, a densidade espectral de potência passa a ser contínua na mesma faixa. Sendo $f(\alpha_n) = f_m \cos \alpha_n + f_c$ e observando que $f(\alpha_n)$ é função par, pode-se realizar um mapeamento entre a fração da potência total incidente no intervalo $[\alpha_n, \alpha_n + d\alpha]$ e a potência no intervalo $[f, f + df]$ do espectro de potência.

A figura 2.8 ilustra o receptor móvel se deslocando da esquerda para a direita, onde incidem ondas com diferença angular $d\alpha$, onde a potência presente nestas ondas será igual à área das figuras geométricas de base df .

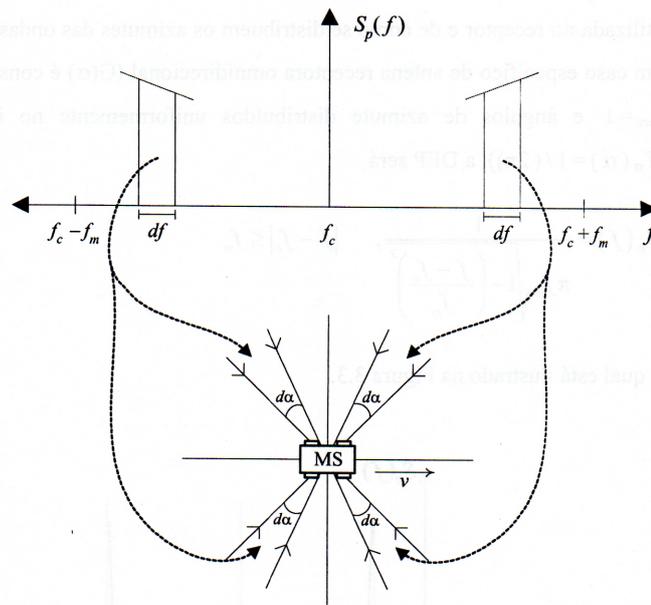


Figura 2.8: Mapeamento da fração de potência incidente para o espectro de potência do sinal [16]

Se o ângulo de azimute α tiver densidade de probabilidade dada por $f_\alpha(\alpha)$, então a fração da potência total recebida no intervalo $[\alpha, \alpha + d\alpha]$ será $f_\alpha(\alpha)d\alpha$. Por outro lado, a fração de potência recebida no intervalo de frequência $[f, f + df]$ será dado por $S_p(f)df$. Assim sendo, é válida a relação dada pela equação (2.22):

$$S_p(f)|df| = b_{av}[f_\alpha(\alpha)G(\alpha) + f_\alpha(-\alpha)G(\alpha)]|d\alpha| \quad (2.22)$$

onde:

$G(\alpha)$ - ganho da antena; e

b_{av} - potência média que seria recebida por uma antena isotrópica.

Invertendo a equação $f(\alpha_n) = f_m \cos \alpha_n + f_c$ para α , obtém-se:

$$\alpha_n(f) = \arccos\left(\frac{f - f_c}{f_m}\right) \quad (2.23)$$

Derivando a equação (2.23), chega-se à equação (2.24):

$$\frac{d\alpha}{df} = \frac{-1}{f_m \sqrt{1 - \left(\frac{f - f_c}{f_m}\right)^2}} \quad (2.24)$$

Aplicando este resultado na equação (2.22), obtém-se a densidade espectral de potência dada pela equação (2.25):

$$S_p(f) = \frac{b_{av}}{f_m \sqrt{1 - \left(\frac{f - f_c}{f_m}\right)^2}} (f_\alpha(\alpha)G(\alpha) + f_\alpha(-\alpha)G(-\alpha)), \quad |f - f_c| \leq f_m \quad (2.25)$$

Da equação (2.25), identifica-se que a densidade espectral de potência depende do tipo de antena utilizada no receptor e de como se distribuem os azimutes das ondas incidentes, entre outros fatores. Para o caso específico de uma antena receptora omnidirecional ($G(\alpha)$ é constante e unitário), $b_{av} = 1$ e ângulos de azimute distribuídos uniformemente no intervalo $[0, 2\pi]$ ($f_\alpha(\alpha) = 1/2\pi$). Nesse caso, a densidade espectral de potência será dada pela equação (2.26):

$$S_p(f) = \frac{1}{\pi f_m \sqrt{1 - \left(\frac{f - f_c}{f_m}\right)^2}}, \quad |f - f_c| \leq f_m \quad (2.26)$$

A figura 2.9 ilustra o espectro Doppler de acordo com o modelo proposto por Clarke:

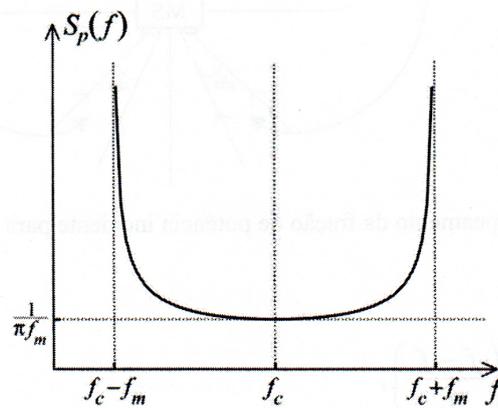


Figura 2.9: Espectro Doppler sujeito ao desvanecimento (Antena omnidirecional e ângulo azimute com distribuição uniforme) [16]

Esta é uma abordagem clássica para o cálculo da densidade espectral de potência em um canal com desvanecimento, sendo introduzida por Jakes, em 1974, porém, a densidade espectral de potência em (2.26) foi primeiramente apresentada por Clarke, em 1968 [20], obtida através da transformada de Fourier da função autocorrelação do processo aleatório proveniente do modelo de propagação por espalhamento.

2.7.1.2 Modelo de Aulin

Em um ambiente urbano, as componentes de onda espalhadas não necessariamente se propagam horizontalmente. A difração que ocorre no topo do telhado das edificações faz com que a n -ésima componente de onda chegue ao receptor com um ângulo de elevação β_n . Com o objetivo de investigar a influência desta propagação não horizontal no sinal recebido, Tor Aulin [23] propôs um modelo matemático tridimensional de propagação por espalhamento, que tem o modelo de Clarke (bidimensional) como um caso especial. A figura 2.10 ilustra o modelo de Aulin.

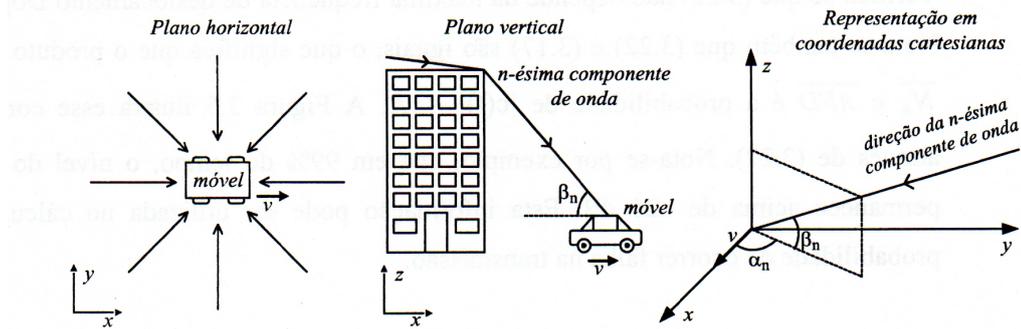


Figura 2.10: Modelo tridimensional de propagação por espalhamento

Assim como no modelo de Clarke, o sinal recebido total em um determinado ponto no espaço pode ser dado pela equação (2.27):

$$c = E_0 \sum_{n=1}^M A_n e^{j\phi_n} \quad (2.27)$$

Em outro ponto no espaço, distante Δs do ponto inicial na direção do eixo x e sem componente de deslocamento no eixo z , a fase da n -ésima componente da onda não será mais ϕ_n , mas sim $(\phi_n + 2\pi/\lambda \Delta s \cos \alpha_n \cos \beta_n)$. Se o receptor estiver em movimento com uma velocidade v e percorrer o espaço Δs em um intervalo $\Delta t = t - t_i$, com $t_i = 0$ (tempo de referência), então a fase da n -ésima componente de onda será dada por:

$$\phi_n + 2\pi \frac{v}{\lambda} t \cos \alpha_n \cos \beta_n = \phi_n + 2\pi f_m t \cos \alpha_n \cos \beta_n = \phi_n + \omega'_n t \quad (2.28)$$

onde:

$$\omega'_n = 2\pi f_m \cos \alpha_n \cos \beta_n.$$

O sinal recebido total pode agora ser reescrito em função do tempo e será dado pela equação (2.29)

$$c'(t) = E_0 \sum_{n=1}^M A_n e^{j(\omega_n t + \phi_n)} \quad (2.29)$$

A equação (2.29) representa o modelo matemático tridimensional de propagação por espalhamento, onde α_n , β_n , ϕ_n e A_n são variáveis aleatórias estatisticamente independentes.

Na referência [15] há o desenvolvimento da equação (2.29), onde se obtém $c'(t)$ em função de componentes em quadratura ($I(t)$ e $Q(t)$). Sendo M elevado, na prática $M \geq 6$ multipercursos já satisfaz esta condição, pode-se dizer que as componentes $I(t)$ e $Q(t)$, de $c'(t)$, onde as amplitudes de $I(t)$ e $Q(t)$ podem ser tanto negativas quanto positivas, são processos gaussianos independentes, de média nula. Desse modo, $c'(t)$ pode ser completamente caracterizado por seu valor médio e a função autocorrelação.

Neste caso, a média de $c'(t)$ será dada por:

$$E\{c'(t)\} = E_0 \sum_{n=1}^M E\{A_n\} E\{e^{j\omega'_n t}\} E\{e^{j\phi_n}\} = 0 \quad (2.30)$$

Isso implica em:

$$E\{Re\{c'(t)\}\} = E\{Im\{c'(t)\}\} = 0 \quad (2.31)$$

A função autocorrelação será dada por:

$$R_c(\tau) = E_0^2 \sum_{n=1}^M E\{|A_n|^2\} E\{e^{j2\pi f_m \tau \cos \alpha_n \cos \beta_n}\} \quad (2.32a)$$

$$= E_0^2 \sum_{n=1}^M E\{|A_n|^2\} \iint e^{j2\pi f_m \tau \cos \alpha_n \cos \beta_n} f_\alpha(\alpha_n) f_\beta(\beta_n) d\alpha_n d\beta_n \quad (2.32b)$$

$$= E_0^2 \sum_{n=1}^M E\{|A_n|^2\} \int J_0(2\pi f_m \tau \cos \beta_n) f_\beta(\beta_n) d\beta_n \quad (2.32c)$$

$$= 2\sigma^2 \int J_0(2\pi f_m \tau \cos \beta) f_\beta(\beta) d\beta \quad (2.32d)$$

onde:

$f_\alpha(\alpha_n)$ e $f_\beta(\beta_n)$ são as funções densidades de probabilidade de α_n e β_n e $f_\alpha(\alpha_n)$ for suposta distribuída uniformemente, significando probabilidades iguais para qualquer ângulo de 0 a 2π , ou seja, $f_\alpha(\alpha_n) = 1/2\pi$, para qualquer $0 < \alpha_n < 2\pi$.

Assumindo que $f_\beta(\beta_n)$ não varia com o tempo, esse processo pode ser considerado como WSS. Além disso, pode-se concluir que $c'(t)$ tem sua envoltória dada por uma distribuição de Rayleigh e sua fase foi considerada uniformemente distribuída no intervalo $[0,$

$2\pi]$, como no modelo de Clarke. Porém, é evidente através da equação (2.32) a influência do ângulo de elevação na função de autocorrelação. Conseqüentemente, o espectro de potência resultante sofrerá alterações quando comparado ao espectro obtido por Clarke.

Em princípio, o espectro Doppler para esse modelo pode ser calculado utilizando a relação de Wiener-Khinchine dada pela equação (2.33):

$$2\sigma^2 S'_n(f) = \mathcal{F} \left\{ 2\sigma^2 \int J_0(2\pi f_m \tau \cos \beta_n) f_\beta(\beta_n) d\beta_n \right\} \quad (2.33)$$

Destaca-se que, dependendo da forma assumida pela função $f_\beta(\beta)$, o cálculo da transformada de Fourier pode não se dar de forma direta.

Aulin [23], definiu a função densidade de probabilidade para o ângulo de elevação ($f_\beta(\beta)$) como sendo a equação (2.34):

$$f_\beta(\beta) = \begin{cases} \frac{\cos \beta}{2 \sin \beta_{max}}, & |\beta| \leq \beta_{max} \leq \frac{\pi}{2} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.34)$$

A figura 2.11 ilustra esta equação, sendo realista para pequenos valores de β_{max} :

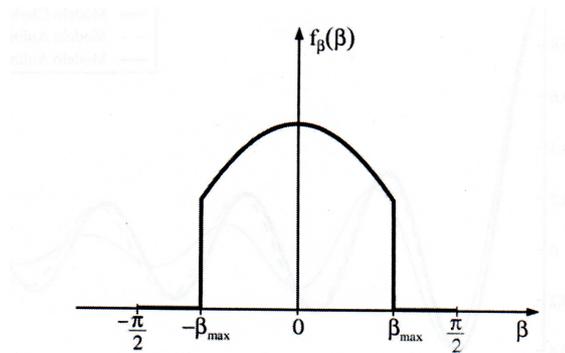


Figura 2.11: Densidade de probabilidade da função $f_\beta(\beta)$ proposta por Aulin

Sendo a função densidade de probabilidade para o ângulo de elevação ($f_\beta(\beta)$) dada pela equação (2.34), a sua densidade espectral de potência será dada por:

$$S'_n(f) = \begin{cases} 0, & |f| > f_m \\ \frac{1}{2f_m \sin \beta_{max}}, & f_m \cos \beta_{max} \leq |f| \leq f_m \\ \frac{1}{2\pi f_m \sin \beta_{max}} \left\{ \frac{\pi}{2} - \arcsin \left[\frac{2 \cos^2 \beta_{max} - 1 - \left(\frac{f}{f_m}\right)^2}{1 - \left(\frac{f}{f_m}\right)^2} \right] \right\}, & |f| \leq f_m \cos \beta_{max} \end{cases} \quad (2.35)$$

Identifica-se, observando a figura 2.9, que o modelo bidimensional de Clarke tende ao infinito quando a frequência tende ao máximo desvio Doppler ($f_m \pm f_c$), enquanto no modelo tridimensional de Aulin o espectro assume valor finito nestes pontos, além de ser constante durante a faixa próxima de f_m . A figura 2.12 ilustra a comparação entre os modelos de Clarke e Aulin, adotando dois valores para o ângulo de elevação ($\beta_{max}=5^\circ$ e $\beta_{max}=20^\circ$).

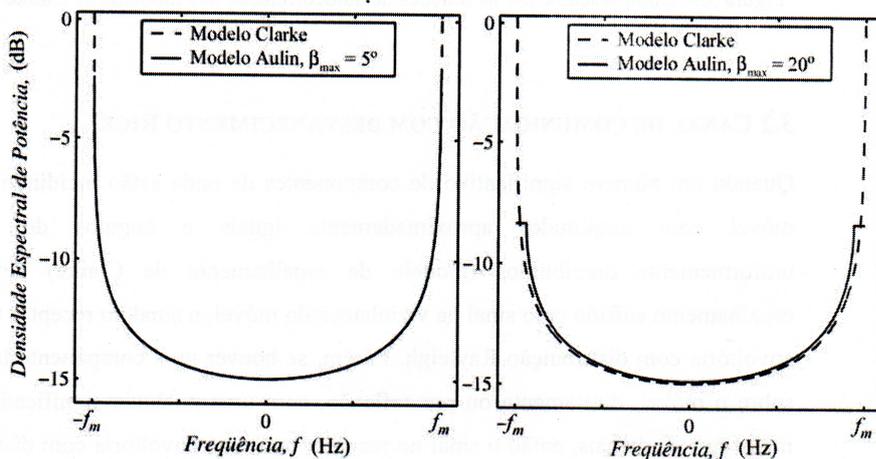


Figura 2.12: Comparação entre as densidades espectrais de potência nos modelos de Clarke e Aulin [16]

2.7.2 Tempo de Coerência

É definido como o tempo sobre o qual a resposta ao impulso do canal é essencial-

mente invariante, ou seja, dois sinais que chegam ao receptor possuem forte correlação de amplitude, tipicamente maior que 90% de correlação. Quando dois sinais que incidirem no receptor tiverem um intervalo de tempo Δt entre si maior que o tempo de coerência T_c , isto é, ($\Delta t > T_c$), estes serão afetados de forma diferente pelo canal, enquanto caso este intervalo de tempo seja menor que o tempo de coerência ($\Delta t < T_c$), estes terão alta probabilidade de possuírem amplitudes correlacionadas. Por esse motivo é que o tempo de coerência é fator primordial em sistemas que adotam o uso da diversidade no tempo e utiliza a retransmissão de mensagens. Nestes casos, é necessário que o intervalo entre as retransmissões seja maior que o tempo de coerência ($\Delta t > T_c$), de forma que as mesmas sejam afetadas diferentemente pelo canal e para que a diversidade seja efetiva. Tendo em vista que o espalhamento na frequência é responsável pela variação nas amplitudes das componentes do sinal transmitido, o tempo de coerência do canal terá uma relação inversa com o espalhamento Doppler. Matematicamente, o tempo de coerência pode ser expresso pela equação (2.36), em casos particulares:

$$T_c \cong \frac{1}{5\sigma_{fd}} \quad (2.36)$$

onde:

σ_{fd} - espalhamento Doppler.

2.7.3 Taxa de Cruzamento de Nível

A taxa de cruzamento de nível (LCR - *Level Crossing Rate*) é definida como a taxa com que o sinal recebido, normalizado em relação ao seu valor *rms*, cruza um determinado valor limiar estabelecido, em um dos sentidos (nível de sinal crescente ou decrescente). Se o sinal cruza N vezes um nível R durante um período T , então, em média, a taxa de cruzamento de nível é N/T .

Em termos estatísticos, a taxa de cruzamento de nível pode ser calculada por meio da equação (2.37):

$$N_R = E [r|_{r=R}] = \int_0^{\infty} rp(r, R)dr \quad (2.37)$$

onde:

r - derivada de primeira ordem do sinal resultante recebido; e

R - limiar de interesse.

A integração de zero a infinito considera todas as derivadas positivas, ou seja, nível de sinal crescente. A taxa de cruzamento de nível é útil, por exemplo, para o dimensionamento de códigos corretores de erros e algoritmos de *handoff*.

2.7.4 Duração Média de Desvanecimento

A duração média de desvanecimento (AFD - *Average Fade Duration*) é definida como a razão entre o tempo médio em que a envoltória do sinal recebido, normalizado em relação ao seu valor eficaz, fica abaixo de um determinado nível R , e o número total de cruzamento do nível, ambos medidos em um intervalo T .

Estatisticamente, a duração média de desvanecimentos pode ser calculada através de:

$$T_R = \frac{\text{prob}(r \leq R)}{N_R} = \frac{1}{N_R} \int_0^R p(r) dr \quad (2.38)$$

A figura 2.13 ilustra as variáveis que levam à determinação da taxa de cruzamento de nível e a duração média de desvanecimento de um sinal, para um dado nível especificado R .

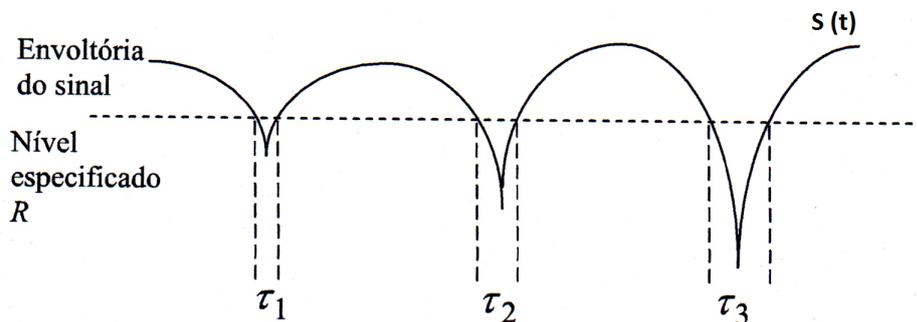


Figura 2.13: Variáveis definidas no cálculo da LCR e AFD

Essa estatística, tem como uma de suas aplicações, a estimativa do tamanho de quadros e dos blocos de entrelaçamento (do inglês, *interleaving*) em um sistema de comunicação móvel.

2.8 Sumário

Neste capítulo foram descritos os fatores que afetam o sinal recebido em um ambiente de comunicações móveis, como a perda no percurso, que corresponde à variação do nível do sinal com a distância, independente da comunicação ser móvel ou não. Os outros dois fatores foram o desvanecimento de larga escala, relacionado à variação do valor mediano do campo elétrico recebido devido às obstruções provocadas pelo relevo ou por edificações e o desvanecimento de pequena escala, correspondente a curtas variações no nível do sinal.

Além da abordagem dos fatores que afetam o sinal, também foi descrito que a dispersão temporal do sinal pode ser quantificada através do retardo médio, espalhamento de retardo e banda de coerência, parâmetros estes característicos de um canal faixa larga. No caso do canal faixa estreita os multipercursos fazem com que o sinal recebido apresente uma correspondente variação de fase, cuja taxa pode ser vista como uma variação de frequência do sinal recebido em cada multipercurso, formando o espalhamento Doppler ou espectro Doppler, de onde se pode extrair o parâmetro tempo de coerência. A taxa de cruzamento de nível e a duração média de desvanecimento, utilizadas, respectivamente, em códigos corretores de erros e estimativa do tamanho de quadros e dos blocos de entrelaçamento também foram descritas.

Capítulo 3

Análise Estatística do Sinal

3.1 Introdução

A experiência tem mostrado que a informação do valor mediano do sinal recebido não é suficiente para caracterizar o desempenho dos sistemas de rádio comunicação móvel, sendo importante, também, determinar a variabilidade do sinal em torno do seu nível médio, pois, mediante estes dados, torna-se possível conhecer o comportamento do sinal e determinar a taxa com que o sinal cruza um determinado nível e o tempo em que este sinal permanece abaixo deste nível. Estes fatores são importantes, por exemplo, na determinação de parâmetros como taxa de transmissão, tipo de modulação, proteção contra interferência, medidas de diversidade, métodos de codificação, entre outros.

Entretanto, quando se considera a natureza dos efeitos de sombreamento e multi percurso e suas influências na propagação da onda eletromagnética em um ambiente com mobilidade, fica evidente que uma caracterização analítica mais precisa só é possível pensando no sinal recebido como uma variável aleatória. Deste modo, se faz necessário analisar o fenômeno da propagação por processos estocásticos, sendo possível na maioria dos casos descrever de forma satisfatória os parâmetros de propagação envolvidos em um sistema de comunicação móvel. Sendo assim, é fundamental conhecer as propriedades fundamentais das distribuições de probabilidades mais usadas nos estudos da estatística da propagação do sinal rádio móvel [24, 25].

Este capítulo apresenta um histórico sucinto, bem como faz um resumo das características principais das distribuições que serão abordadas na análise estatística deste trabalho, desde a distribuição utilizada para modelar o desvanecimento lento, a distribui-

ção log-normal, como as distribuições utilizadas para modelar o desvanecimento rápido, tais como a distribuição Rayleigh, Rice, Nakagami-m e $\alpha - \mu$.

Além das estatísticas de primeira ordem, a função densidade de probabilidade (*Probability Density Function* - PDF) e da função distribuição cumulativa (*Cumulative Distribution Function* - CDF), serão abordadas, também, as estatísticas de segunda ordem, como a taxa de cruzamento de nível e a duração média de desvanecimento.

3.2 Distribuição Normal

A distribuição normal, possui uma longa história e está relacionada as probabilidades em matemática, onde no século XVII, surgiu para resolver questões de apostas de jogos de azar. O responsável mais direto da distribuição normal foi Abraham de Moivre, matemático francês, que a definiu em 1730, dando sequência aos trabalhos de Jacob Bernoulli e de seu sobrinho Nicolaus Bernoulli. Pierre Simon Laplace, matemático, astrônomo e físico francês, em 1783 a utilizou para descrever a distribuição dos erros, e Johann Carl Friedrich Gauss, em 1809 a empregou para analisar dados astronômicos. Inclusive, a curva normal é chamada de distribuição de Gauss. Hoje em dia, a curva normal é empregada amplamente, pois, a normalidade ocorre naturalmente em muitas medidas de situações físicas, biológicas e sociais, sendo fundamental para a inferência estatística.

Dados experimentais [21] têm demonstrado que o desvanecimento de larga escala, causado pelo sombreamento das obstruções físicas encontradas pelo sinal rádio móvel entre o transmissor e o receptor, pode ser modelado por uma distribuição normal ou gaussiana. Como a variação da amplitude do sinal em grande escala envolve grandes distâncias, é conveniente que os valores das amplitudes sejam expressos em decibéis, que é uma medida em escala logarítmica.

A distribuição log-normal pode ser obtida partindo de uma distribuição gaussiana e aplicando o Teorema fundamental da estatística [26], onde se chega a função densidade de probabilidade log-normal dada pela equação (3.1) [25]:

$$p(r) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \frac{1}{r} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{(\ln r - m)^2}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (3.1)$$

Perceba que nestas relações, m e σ não são respectivamente a média e o desvio

padrão da variável r , mas sim do logaritmo da variável r .

A função distribuição cumulativa, que estabelece a probabilidade da envoltória do sinal recebido não exceder um determinado valor R , é dada de acordo com a equação (3.2) [25]:

$$P(r) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^r \frac{1}{t} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{(\ln t - m)^2}{2\sigma^2} \right) \right] dt = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\ln r - m}{\sigma\sqrt{2}} \right) \right] \quad (3.2)$$

As características quantitativas da distribuição log-normal podem ser obtidas sem dificuldade, sendo as seguintes:

- valor mais provável: $\exp(m - \sigma^2)$
- valor mediano: $\exp(m)$
- valor médio: $\exp\left(m + \frac{\sigma^2}{2}\right)$
- valor médio quadrático: $\exp(m + \sigma^2)$
- desvio padrão: $\exp\left(m + \frac{\sigma^2}{2}\right) \sqrt{\exp(\sigma^2) - 1}$

Ao contrário da distribuição normal, a distribuição log-normal é extremamente assimétrica e o valor médio, o valor mediano e o valor mais provável (também chamado de moda) são mostrados na figura 3.1, ilustrando a comparação entre as duas distribuições.

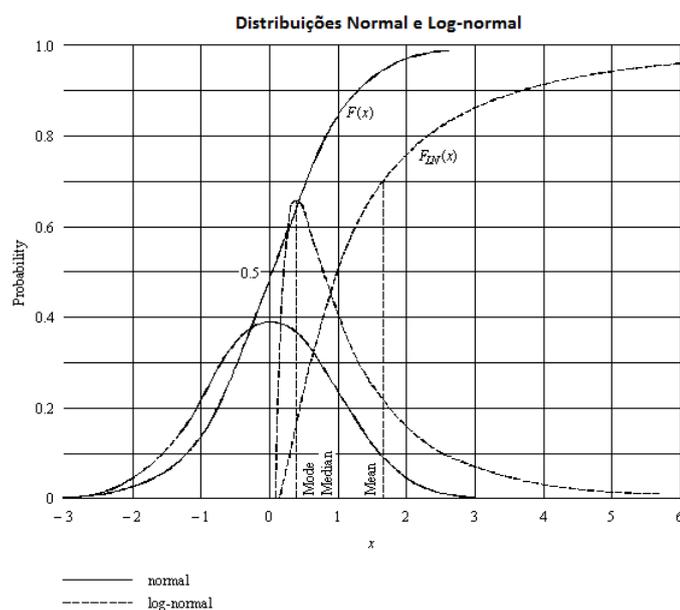


Figura 3.1: Distribuições normal e log-normal

3.3 Distribuição Rayleigh

A distribuição Rayleigh foi proposta em 1880 por John William Strutt, o Lord Rayleigh [27] para ser utilizada na área de eletromagnetismo. Posteriormente, no ano de 1935, Joseph Lade Pawsey [28], um dos pioneiros e expoentes da rádio astronomia, utilizou essa distribuição para modelar dados de medidas de potência do sinal de rádio.

O modelo físico da distribuição Rayleigh considera que as componentes em fase e quadratura do sinal são formadas pela soma dos múltiplos percursos existentes no percurso entre o transmissor e o receptor. Aplicando o Teorema Central do Limite, estas componentes podem ser modeladas como uma distribuição Gaussiana bidimensional com duas variáveis x e y independentes, de média nula e mesmo desvio padrão σ , cujo módulo $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ corresponde à envoltória do sinal.

Deste modo, de acordo com [25], a função densidade de probabilidade da envoltória r , é dada pela equação (3.3):

$$p(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.3)$$

A probabilidade da envoltória do sinal recebido não exceder um determinado valor é dada pela função distribuição cumulativa, de acordo com a equação (3.4) [25]:

$$P(r) = P_r(R \leq r) = \int_0^r p(R)dR = 1 - \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.4)$$

A figura 3.2 ilustra a função densidade de probabilidade e a função distribuição cumulativa de Rayleigh.

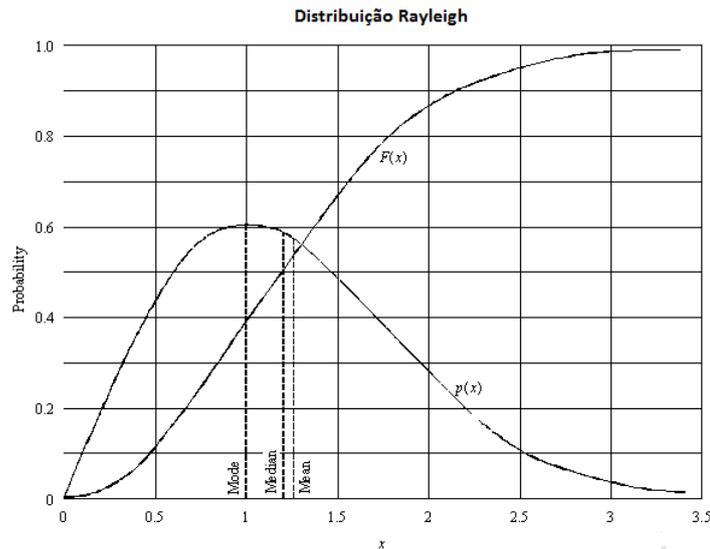


Figura 3.2: Funções $p(r)$ e $P(r)$ de Rayleigh

Os valores característicos da distribuição Rayleigh são os seguintes :

- valor mais provável: σ
- valor mediano: $\sigma\sqrt{2 \ln 2} = 1.18\sigma$
- valor médio: $\sigma\sqrt{\frac{\pi}{2}} = 1.25\sigma$
- valor médio quadrático: $\sigma\sqrt{2} = 1.41\sigma$
- desvio padrão: $\sigma\sqrt{2 - \frac{\pi}{2}} = 0.655\sigma$

Note que σ é o desvio padrão derivado de uma distribuição Gaussiana com que a distribuição Rayleigh está relacionada. É muitas vezes referida como função gaussiana complexa.

3.3.1 Taxa de Cruzamento de Nível Rayleigh

Conforme já descrito no capítulo 2, a taxa de cruzamento de nível determina a frequência esperada com que o sinal cruza um determinado nível. Para sinais caracterizados pela distribuição Rayleigh, a taxa de cruzamento de nível, por segundo, a um nível R , é dada pela equação (3.5) [8, 31]:

$$N_R(\rho) = \sqrt{2\pi}f_m \rho \exp(-\rho^2) \quad (3.5)$$

onde:

f_m é o máximo desvio Doppler;

$$\rho = \frac{r}{\sqrt{2}\sigma} = \frac{r}{r_{rms}} ; \text{ e}$$

r_{rms} é o valor eficaz da envoltória do sinal.

3.3.2 Duração Média de Desvanecimento Rayleigh

A duração média de desvanecimento, conceituada no capítulo 2, estabelece o tempo médio que cada desvanecimento permanece abaixo de um dado nível R . A duração média de desvanecimento é dada pela equação (3.6) [8, 31]:

$$T_R(\rho) = \frac{\exp(\rho^2) - 1}{\sqrt{2\pi}f_m\rho} \quad (3.6)$$

3.4 Distribuição Rice

Em 1944, com o objetivo de modelar o efeito do ruído em sistemas FM, Stephen O. Rice, um dos pioneiros no campo da teoria das comunicações, apresentou um trabalho [29] propondo uma distribuição mais ampla, conhecida como distribuição Rice, e tendo, como caso particular, a distribuição Rayleigh.

A distribuição Rice ou riciana descreve a envoltória do sinal recebido resultante de um nível de sinal forte adicionado a sinais mais fracos. A componente de amplitude dominante pode ser proveniente tanto de um ambiente com linha de visada (*Line Of Sight* - LOS), quanto de um ambiente sem linha de visada (*Non-Line Of Sight* - NLOS), enquanto que os demais sinais são originados em múltiplos percursos, causados por reflexões, difrações e espalhamento em obstáculos na região onde se encontra o receptor.

Sendo a variável a designada à amplitude do sinal dominante e σ , o valor médio das amplitudes em múltiplos percursos, o modelo estatístico da função densidade de probabilidade da envoltória r da distribuição Rice, em escalar linear, é dada pela equação (3.7) [25]:

$$p(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2 + a^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{ar}{\sigma^2}\right) \quad (3.7)$$

onde:

$I_0(\cdot)$ é a função de Bessel modificada de primeira espécie e ordem zero.

A função distribuição cumulativa pode ser obtida através da equação (3.7), sendo dada pela equação (3.9) [40]:

$$P_R(r) = 1 - Q\left(\frac{a}{\sigma}, \frac{r}{\sigma}\right) \quad (3.8)$$

onde:

$$Q(a, b) = \int_b^{\infty} x \exp\left(-\frac{x^2 + a^2}{2}\right) I_0(ax) dx \quad (3.9)$$

De acordo com Parsons [8], é comum expressar a distribuição Rice em função do parâmetro K , denominado de fator de Rice, definido como a razão entre a potência do sinal dominante e a potência média total dos sinais em múltiplos percursos

O fator de Rice K é dado pela equação (3.10):

$$K = \frac{a^2}{2\sigma^2} \quad (3.10)$$

À medida que o fator de Rice tende para zero ($K \rightarrow 0$), a distribuição Rice tende a uma distribuição Rayleigh. Por outro lado, caso o parâmetro K tenda a um valor muito maior que 1 ($K \gg 1$), a distribuição Rice tende a uma distribuição gaussiana. A figura 3.3 ilustra a função densidade de probabilidade de Rice para os valores de ($K \rightarrow 0$), $K \cong 1$ e $K \gg 1$.

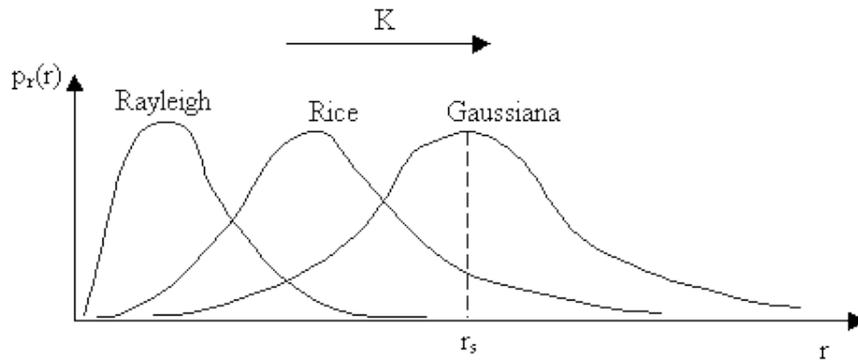


Figura 3.3: Função densidade de probabilidade de Rice: (a) $(K \rightarrow 0)$, (b) $k \cong 1$ e (c) $k \gg 1$

3.4.1 Taxa de Cruzamento de Nível Rice

Supondo que a envoltória do sinal siga uma distribuição riciana, a taxa de cruzamento de nível é dada pela equação (3.11) [30, 31]:

$$N_R(\rho) = \sqrt{2\pi(K+1)} f_m \rho \exp(-K - (k+1)\rho^2) I_0\left(2\rho\sqrt{K(K+1)}\right) \quad (3.11)$$

onde:

$$\rho = \frac{R}{\sqrt{\Omega_p}} = \frac{R}{r_{rms}} ; e$$

$$r_{rms} \triangleq \sqrt{\Omega_p}$$

3.4.2 Duração Média de Desvanecimento Rice

De forma análoga para o considerado para a taxa de cruzamento de nível descrito, tem-se a duração média de desvanecimento dada pela equação (3.12) [31, 32]:

$$T_R(\rho) = \frac{1 - Q\left(\sqrt{2K}, \sqrt{2(K+1)\rho^2}\right)}{\sqrt{2\pi(K+1)} f_m \rho \exp(-K - (k+1)\rho^2) I_0\left(2\rho\sqrt{K(K+1)}\right)} \quad (3.12)$$

3.5 Distribuição Nakagami-m

A distribuição Nakagami-m é relativamente recente, foi proposta em 1960 [34], por Minoru Nakagami, para caracterizar o fenômeno do desvanecimento rápido do sinal em

ondas curtas (3 MHz a 30 MHz) e em longas distâncias, sendo uma solução mais geral, porém, aproximada do problema da superposição de sinais com fases aleatórias. Tendo em vista a sua complexidade [36], Nakagami, por meio de métodos empíricos baseados em medidas de campo e ajustes de curvas, chegou a uma distribuição aproximada.

A função densidade de probabilidade é dada pela equação (3.13) [34]:

$$p(r) = \frac{2m^m}{\Gamma(m)\Omega^m} r^{2m-1} \exp\left(-\frac{m}{\Omega} r^2\right) \quad (3.13)$$

onde:

r é a envoltória do sinal e Γ é a função gama, sendo m e Ω dados, respectivamente, por [36]:

$$m = \frac{\Omega^2}{\text{Var}(r^2)} \geq \frac{1}{2} \quad (3.14)$$

$$\Omega = E[r^2] \quad (3.15)$$

O parâmetro m é chamado de fator de desvanecimento e descreve o grau de desvanecimento sofrido pelo sinal se propagando em um ambiente de múltiplos percursos, além de determinar a inclinação das curvas traçadas em função dos valores medidos. Terá uma boa aproximação somente quando seu valor for definido para $m \geq \frac{1}{2}$, sendo o fator de maior influência na distribuição. Caso $m < 1$, o desvanecimento é mais severo do que o modelo Rayleigh ($m = 1$). Se $m > 1$, o desvanecimento é menos severo do que Rayleigh. E para $m \rightarrow \infty$, reproduz-se um ambiente sem desvanecimento.

A probabilidade da envoltória do sinal recebido não exceder um determinado valor é dada pela função distribuição cumulativa, de acordo com a equação (3.16) [40] :

$$P_R(r) = \frac{\gamma(m, mr^2/\Omega)}{\Gamma(m)} \quad (3.16)$$

onde:

$\gamma(a, x)$ é a função gama incompleta dada pela equação (3.17) [41]:

$$\gamma(a, x) = \int_0^x \exp(-t) t^{a-1} dt \quad (3.17)$$

A distribuição Nakagami- m se relaciona com as outras distribuições. Constata-se que para o caso de $m = 1$, a distribuição Nakagami- m recai em uma distribuição Rayleigh, sendo portanto, a distribuição Rayleigh um caso particular da Nakagami- m .

A distribuição Nakagami- m se associa à distribuição Rice através de duas relações simples. As fórmulas que relacionam os parâmetros k e σ^2 , da distribuição Rice, com os parâmetros m e Ω da distribuição Nakagami- m , são os descritos através das seguintes equações [37]:

$$k = \frac{\sqrt{m^2 - m}}{m - \sqrt{m^2 - m}} \quad m \geq 1 \quad (3.18)$$

$$\sigma^2 = \frac{\Omega}{2} (1 - \sqrt{1 - m^{-1}}) \quad (3.19)$$

A distribuição Nakagami- m possui uma ampla variedade de aplicações [38], pois fornece bons ajustes, sendo uma das distribuições mais estudadas e utilizadas pela comunidade científica.

3.5.1 Taxa de Cruzamento de Nível Nakagami- m

A taxa de cruzamento de nível é dada pela equação (3.20) [31, 39]:

$$N_R(\rho) = \sqrt{2\pi} f_m \frac{m^{m-\frac{1}{2}}}{\Gamma(m)} \rho^{2m-1} \exp(-m\rho^2) \quad (3.20)$$

3.5.2 Duração Média de Desvanecimento Nakagami- m

A duração média de desvanecimento é dada pela equação (3.21) [31, 39]:

$$T_R(\rho) = \frac{\Gamma(m, m\rho^2)}{\sqrt{2\pi} f_m m^{m-\frac{1}{2}}} \rho^{2m-1} \exp(-m\rho^2) \quad (3.21)$$

3.6 Distribuição $\alpha - \mu$

A distribuição $\alpha - \mu$ [44, 45] foi proposta recentemente, com o intuito de prover uma melhor caracterização estatística para o sinal rádio móvel, explorando a não-linearidade do meio de propagação. Esta distribuição é uma versão reescrita da distribuição Gama generalizada, que foi proposta, inicialmente, por Amoroso e particularizada por Stacy. Segundo Stacy [46], a proposta se referia a uma generalização da distribuição Gama, sendo esta realizada com a inclusão de um parâmetro positivo no expoente do fator exponencial da mesma, porém, Stacy não associou nenhuma aplicação específica e nem desenvolveu nenhum modelamento físico de algum fenômeno.

Embora, em geral, as estatísticas do canal rádio móvel possam ser bem caracterizadas pelas já citadas distribuições de Gauss, Rayleigh, Rice e Nakagami-m, há situações nas quais nenhuma distribuição se ajusta bem aos dados experimentais, onde uma ou outra se adequa moderadamente. Por este motivo, a obtenção de novas distribuições continuam sendo alvo dos pesquisadores.

A distribuição $\alpha - \mu$ tem como base um modelo de desvanecimento. Devido a isso, seus parâmetros estão diretamente associados com as propriedades físicas do meio de propagação. Como seu próprio nome infere, a distribuição $\alpha - \mu$ é escrita em termos de dois parâmetros físicos, α e μ , que descrevem a não-linearidade do meio de propagação e o número de *clusters* de ondas de multipercurso, respectivamente. Dentro de qualquer *cluster*, as fases das ondas espalhadas são aleatórias e possuem atrasos e espalhamento de retardo similares, sendo relativamente grandes, e se assume que os multipercursos dos *clusters* têm ondas espalhadas com potências idênticas. Ela inclui as distribuições Nakagami-m (e sua versão discreta Chi), Weibull, Exponencial, Semi Gaussiana e Rayleigh como casos especiais.

A envoltória resultante é obtida como uma função não linear do módulo da soma das componentes dos multipercursos. A não linearidade se manifesta em termos de um parâmetro α ($\alpha > 0$), de tal modo que a intensidade do sinal resultante é obtido não simplesmente como o módulo da soma das componentes dos multipercursos, mas como este módulo para um certa potência dada. Para um sinal desvanecido com envoltória r , um parâmetro arbitrário $\alpha > 0$, e o valor médio da raiz α ($\hat{r} = \sqrt[\alpha]{E(r^\alpha)}$), a função densidade de probabilidade $p(r)$ de r é dada pela equação (3.22) [44]:

$$p(r) = \frac{\alpha \mu^\mu r^{\alpha\mu-1}}{\hat{r}^{\alpha\mu} \Gamma(\mu)} \exp\left(-\mu \frac{r^\alpha}{\hat{r}^\alpha}\right) \quad (3.22)$$

onde:

$\mu > 1/2$ é a variância inversa normalizada de r^α , i.e.

$$\mu = \frac{E^2(r^\alpha)}{E(r^{2\alpha}) - E^2(r^\alpha)} \quad (3.23)$$

onde $E(\cdot)$ denota o operador esperança matemática e $\Gamma(z) = \int_0^\infty t^{z-1} \exp(-t) dt$ é a função gama.

Para uma envoltória normalizada $\rho = r/\hat{r}$, a função densidade de probabilidade $p(\rho)$ de ρ é obtida como:

$$p(\rho) = \frac{\alpha \mu^\mu \rho^{\alpha\mu-1}}{\Gamma(\mu)} \exp(-\mu \rho^\alpha) \quad (3.24)$$

A probabilidade da envoltória do sinal recebido não exceder um determinado valor é dada pela função distribuição cumulativa, dada pela equação (3.25) [44]:

$$P(\rho) = \frac{\gamma(\mu, \mu \rho^\alpha)}{\Gamma(\mu)} \quad (3.25)$$

3.6.1 Taxa de Cruzamento de Nível $\alpha - \mu$

A taxa de cruzamento de nível determinada é dada pela equação (3.26) [47]:

$$N_R = \frac{\sqrt{2\pi} f_m r^{\alpha(\mu-0.5)} \mu^{\mu-0.5}}{\Gamma(\mu) \Omega^{\mu-0.5}} \exp\left(-\frac{\mu r^\alpha}{\Omega}\right) \quad (3.26)$$

onde:

$$\Omega = \hat{r}^\alpha = \left(\frac{r}{\rho}\right)^\alpha$$

3.6.2 Duração Média de Desvanecimento $\alpha - \mu$

A duração média de desvanecimento é dada pela equação (3.27) [47]:

$$T_R = \frac{\Gamma(\mu, \mu r^\alpha / \Omega) \Omega^{\mu-0.5}}{\sqrt{2\pi} f_m r^{\alpha(\mu-0.5)} \mu^{\mu-0.5}} \exp\left(\frac{\mu r^\alpha}{\Omega}\right) \quad (3.27)$$

3.7 Sumário

Neste capítulo, foi destacada a importância do estudo das funções distribuição de probabilidade/distribuição cumulativa mais utilizadas nos estudos da análise estatística da envoltória do sinal recebido, descrevendo, de forma sucinta, o histórico de criação e apresentando uma visão geral destas funções, que serão utilizadas para realizar a análise estatística da envoltória do sinal recebido no ambiente de medições estudado.

Capítulo 4

Ambiente e *Set-up* de Medições

4.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os procedimentos e parâmetros relevantes para a realização das medições de campo, além da visão do ambiente sondado e a configuração do *set-up* montado, passando pela descrição de todos os equipamentos que compõem cada bloco do *set-up* de medições.

4.2 Procedimentos de Medições

A primeira definição dos procedimentos foi a de que as medições seriam realizadas no Jardim Botânico do Rio de Janeiro, pois, além do local possuir um ambiente formado por vegetação, agrega em um mesmo espaço trechos de vegetação esparsa e densa, além de trechos formados por duto de palmeiras. A partir daí, foi definida toda a logística para a realização das medições, desde as rotas a serem percorridas no interior do Jardim Botânico, passando pela velocidade de deslocamento do receptor durante a mesma, a taxa de amostragem dos dados e a montagem de cada bloco do *set-up* utilizado.

4.2.1 Definição da Taxa de Amostragem do Sinal Recebido

Um fator de extrema importância na campanha de medições é o valor da taxa de amostragem a ser adotada para a aquisição do sinal. O teorema de Nyquist estabelece que as amostras devem ser obtidas, no mínimo, pelo dobro da máxima componente de variação de frequência do sinal recebido. Assim, se tivermos uma frequência da envoltória

do sinal dada por f_r , que ocupe uma banda B , a taxa de amostragem do sinal a ser amostrado será $2B$, onde de acordo com o teorema de Nyquist corresponde à seguinte relação:

$$f_a \geq 2B \quad (4.1)$$

onde:

B – - banda da envoltória do sinal no receptor; e

f_a - frequência de amostragem.

Em decorrência do deslocamento do receptor, entretanto, ocorrerá o efeito Doppler, resultando no aumento ou diminuição do comprimento de onda recebido. O valor máximo da frequência se dará quando o receptor se deslocar numa direção radial ao transmissor e, resultará em uma frequência máxima de:

$$f_m = \frac{v}{\lambda} \quad (4.2)$$

onde:

λ - comprimento de onda do sinal transmitido; e

v - velocidade do receptor.

Esta frequência máxima f_m corresponde à banda superior de f_r , dada por $f_r + \frac{B}{2}$.

Logo:

$$f_r + \frac{B}{2} = f_r + f_m \Rightarrow B = 2f_m \quad (4.3)$$

Assim, a taxa de amostragem levando em consideração o efeito Doppler será dada por:

$$f_a \geq 4f_m \geq 4\frac{v}{\lambda} \quad (4.4)$$

Este valor corresponde à mínima taxa necessária para amostragem do sinal recebido, considerando uma unidade móvel com velocidade v e uma frequência de transmissão com comprimento de onda λ .

Por outro lado, como um dos objetivos do estudo é a análise da variabilidade rápida do sinal, existe a necessidade, ainda, de se considerar desvanecimentos rápidos e profundos que ocorrem no sinal, devido aos multipercursos, cujo tempo de duração poderá ser menor que o período entre as amostras. Neste caso, a taxa de amostragem calculada levando em consideração somente o teorema de Nyquist e o efeito Doppler não será suficiente para capturar a ocorrência destes desvanecimentos.

Parsons [8], estabelece que em um ambiente Rayleigh, para garantir a captura de 50% dos desvanecimentos profundos, da ordem de 30 dB, com 0,01 comprimento de onda, a envoltória do sinal deve ser amostrado a uma taxa de:

$$f_a = \frac{v}{0,010\lambda} = \frac{100v}{\lambda} \quad (4.5)$$

Como a velocidade do receptor durante a sondagem foi igual a 7 km/h (1,94 m/s), a taxa de amostragem estabelecida, para a captura de desvanecimentos profundos foi igual a 1220 Hz, para o tom transmitido em 1,88 GHz.

4.3 Ambiente Sondado

O ambiente escolhido para a sondagem foi o Jardim Botânico do Rio de Janeiro, que está ilustrado na figura 4.1, onde se tem a marcação das rotas percorridas na realização das medidas, sendo cada rota representada na figura 4.1 por Ri , com i variando de 1 a 7. A direção das setas na figura coincide com o movimento do automóvel, enquanto as medições foram realizadas.



Figura 4.1: Ilustração do ambiente de medições (Fonte: *Google maps*)

Nas figuras 4.2 a 4.8, têm-se imagens fotográficas das rotas percorridas no interior do Jardim Botânico, onde as medições foram realizadas, ilustrando a vegetação ao longo das rotas.

A rota 1, partindo do ponto de transmissão é exibida na figura 4.2, sendo paralela à Rua Jardim Botânico, tendo como divisor entre a rua e a rota, uma fileira de palmeiras. Já a rota 2 tem apenas seus extremos em visada, e a figura 4.3 ilustra a mesma, partindo da rota 1.



Figura 4.2: Visão da rota 1



Figura 4.3: Visão da rota 2

A rota 3 é vista a partir da interseção das rotas 1 e 4, sendo exibida na figura 4.4. A rota 4 é ilustrada na figura 4.5, vista do transmissor (T_x).



Figura 4.4: Visão da rota 3

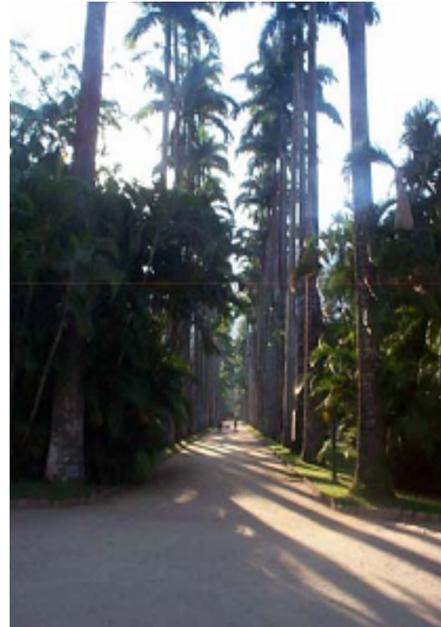


Figura 4.5: Visão da rota 4

A rota 5 é vista na figura 4.6, partindo da rota 2 para a 4, enquanto a rota 6,

inicia-se na rota 4, cruza a rota 7 e termina na rota 2, sendo visualizada através da figura 4.7.



Figura 4.6: Visão da rota 5



Figura 4.7: Visão da rota 6

Partindo da rota 1, mas adentrando pela rota 7, vê-se o percurso da rota 7, na figura 4.8 com frondosas mangueiras nas laterais.



Figura 4.8: Visão da rota 7

Compondo a imagem aérea com as rotas das figuras exibidas, observa-se que a rota 5 tem parte densa e parte esparsa e as restantes ou têm a maior parte em visada ou com vegetação menos densa entre transmissor (T_x) e receptor (R_x).

As características do ambiente, contendo as especificações do tipo de vegetação [48] em cada rota estão descritas a seguir:

- Rota 1 - LOS, com palmeiras (*Roystonea oleracea*: entre 30-50 m de altura) ao longo dos lados e vegetação variada no lado esquerdo (30-40 m altura) com copa variada.
- Rota 2 - NLOS, com vegetação mais densa (*Calycophyllum spruceanum*: 25 m de altura em ambos os lados e um misto entre 30-40 m e 10-20 m nos lados, com algumas palmeiras baixas, principalmente).
- Rota 3 - LOS, com vegetação esparsa (máximo: 6 m altura) ao longo dos lados, no início do rota, e vegetação densa no meio (10-40 m de altura).
- Rota 4 - LOS, com palmeiras altas (30-50 m de altura) e palmeiras baixas (20-25 m de altura) ao longo dos lados. Existe vegetação densa nos lados.
- Rota 5 - NLOS, com vegetação mais densa entre o T_x e o R_x . No lado esquerdo da rota 7, entre as rotas 6 e 5, existem árvores de 20-30 m de altura (*Hymenaea courbaril*) e, do lado direito da rota 7, existem árvores baixas cerca de 6 m de altura.
- Rota 6 - NLOS, com vegetação densa entre o T_x e o R_x . Baixas palmeiras (20-25 m de altura) e vegetação mais densa (*Calycophyllum spruceanum*: um misto de 10-20 m a 30-40 m).
- Rota 7 - NLOS, com mangueiras de troncos espessos (*Mangifera indica*: 20 m de altura - copa entre 5-20 m de altura) em ambos os lados. Existem palmeiras baixas (20-25 m) e copa variada (30-40 m de altura) nos lados.

4.4 *Set-up* de Medições

Para a obtenção dos dados necessários para a realização deste trabalho, foi montado um *set-up*, composto por três blocos: o bloco transmissor, o receptor e o de aquisição e armazenamento. A figura 4.9 ilustra o diagrama de blocos para cada sistema.

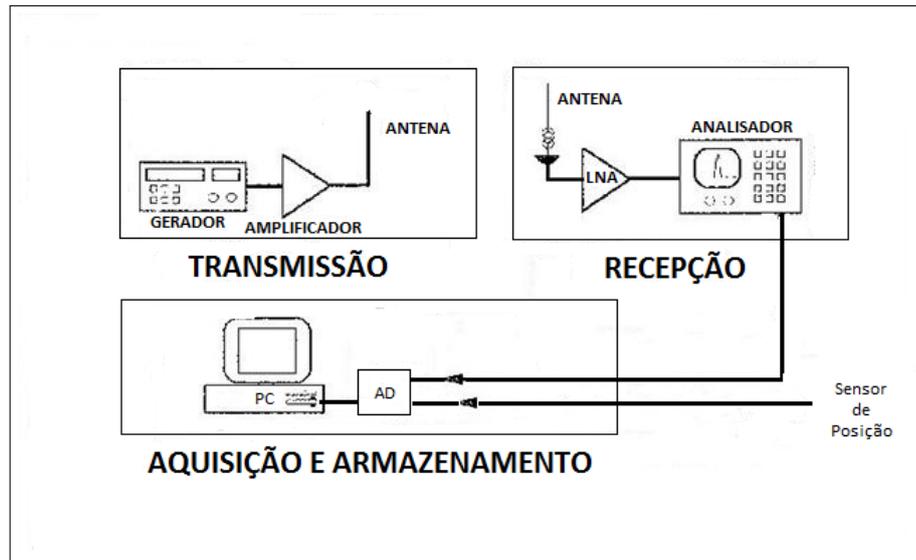


Figura 4.9: Diagrama de blocos

4.4.1 Bloco Transmissor

O sistema transmissor foi responsável pela transmissão de um sinal CW (*Continuous Wave*), uma portadora faixa estreita sem modulação na frequência de 1,88 GHz, montado na entrada do Jardim Botânico (ponto T_x representado na figura 4.1), sendo composto, basicamente, por três componentes: gerador de sinais, amplificador de potência e antena. As figuras 4.11(a) e (b) ilustram os componentes que compõem o sistema transmissor.



(a) Vista do gerador de sinais, fonte e amplificador



(b) Vista do sistema transmissor com mastro e antena

Figura 4.10: Sistema transmissor

4.4.1.1 Gerador de Sinais

O gerador de sinais utilizado foi o modelo SM300 da Rohde & Schwarz, que abrange a faixa de frequência de 9 kHz a 3 GHz, resolução de frequência de 0,1 Hz, resolução de amplitude de 0,1 dB e faixa de operação de sinais de 13 dBm a -127 dBm. A amplitude de saída foi ajustada para 7 dBm em decorrência das especificações do limite de potência máxima na entrada do amplificador de potência.

4.4.1.2 Amplificador de Potência

O amplificador de potência utilizado foi o modelo ZHL-16W-43+ da Mini-Circuits, que fornece um ganho de 40 dB na frequência de interesse. A alimentação do amplificador de potência é de 28 VDC e 4,3 A, sendo fornecida por uma fonte da ICEL , modelo PS-5000.

4.4.1.3 Antena

A antena utilizada no sistema transmissor foi um monopolo omnidirecional da fabricante Anritsu, que cobre a faixa de 1,85 a 1,99 GHz, com impedância de entrada de 50 Ω . No sistema transmissor a antena foi fixada em um mastro com 4 m de altura.

4.4.2 Bloco Receptor

O sistema receptor foi responsável pela medição do sinal, sendo montado no interior de um automóvel de passeio e composto, basicamente, por quatro componentes: antena, amplificador de baixo ruído e analisador de espectro. As figuras 4.11 (a) e (b) ilustram componentes do sistema receptor.



(a) Componentes dos blocos de recepção, aquisição e armazenamento montados no interior do veículo



(b) Antena receptora e LNA fixados no topo do veículo

Figura 4.11: Sistema receptor

4.4.2.1 Antena

A antena utilizada no sistema receptor foi exatamente o mesmo modelo da utilizada no sistema transmissor, ou seja, um monopolo omnidirecional, que cobre a faixa de 1,85 a 1,99 GHz, com impedância de 50Ω . A antena no sistema receptor foi montada no topo do automóvel, a cerca de 1,5 m de altura. A foto da antena utilizada, tanto no sistema transmissor quanto no receptor está ilustrada na figura 4.12 (a), enquanto a figura 4.12 (b) exibe o gráfico do VSWR desta antena.



(a) Antena utilizada nas medições



(b) Gráfico do VSWR da antena utilizada

Figura 4.12: Antena utilizada nas medições e seu gráfico de VSWR

4.4.2.2 Amplificador de Baixo Ruído

A função do amplificador de baixo ruído (*LNA – Low Noise Amplifier*) é pro-

porcionar uma faixa de operação linear adequada para o receptor, de forma a manter o nível do sinal recebido dentro desta faixa. O LNA utilizado foi o modelo ZEL-1724N da Mini-Circuits, que possui 22 dB de ganho para a faixa de frequência de interesse, com uma alimentação de 12 VDC, e foi posicionado imediatamente após a antena receptora, de maneira a propiciar uma menor figura de ruído total para o sistema.

4.4.2.3 Analisador de Espectro

O Analisador de Espectro (*Spectrum Analyzer*) utilizado foi o HP8594E . Para o analisador de espectro desempenhar adequadamente o papel do receptor, foram adotados os seguintes valores com relação aos parâmetros de configuração: faixa de frequência (*span*), tempo de varredura (*sweep time*), largura de faixa de vídeo (VBW) e largura de faixa (BW):

- O *span* foi ajustado em 0 Hz. Assim, o equipamento pode “analisar” um espectro de 0 Hz.
- O *sweep time* foi fixado no menor valor possível fornecido pelo analisador de espectro: 20 μ s. Dessa maneira, pode ser visualizado na tela um sinal na forma de um segmento de reta, uma vez que não se está disponibilizando tempo suficiente para alterações no nível do sinal antes do mesmo ser completamente desenhado.
- O VBW e o BW são parâmetros que definem o formato de filtros internos do analisador. Quanto menor forem os valores selecionados, menor será a largura de banda desses filtros e, portanto, menos ruído será captado pelo equipamento; por outro lado, cresce a sensibilidade com relação a mudanças de temperatura, uma vez que a variação de temperatura pode afetar a frequência central dos filtros em questão. Dessa forma, a seleção dos valores está diretamente relacionada à faixa de valores de potência que se consegue medir, o que, por sua vez, depende do modelo de analisador utilizado. Os melhores valores para o modelo de analisador de espectro usado nas medidas foram 30 kHz e 30 Hz para o VBW e o BW, respectivamente.

A coleta dos dados medidos pelo analisador foi efetuada através da saída de vídeo, sendo esta saída conectada à placa de aquisição. Essa saída fornece uma tensão que representa a amplitude do sinal desenhado na tela do analisador de espectro. A amplitude,

por sua vez, é proporcional ao nível de potência medido. É suficiente, portanto, determinar essa proporção, e com isso definir a potência de recepção da portadora. Esta atividade foi feita em conjunto com a obtenção da curva de calibração do equipamento.

Para obter a curva de calibração do Analisador de Espectro, foi aplicado um sinal conhecido, produzido por um gerador de sinais, e foi medida a saída de vídeo, que é a resposta final do sistema. A figura 4.13 apresenta a curva obtida.

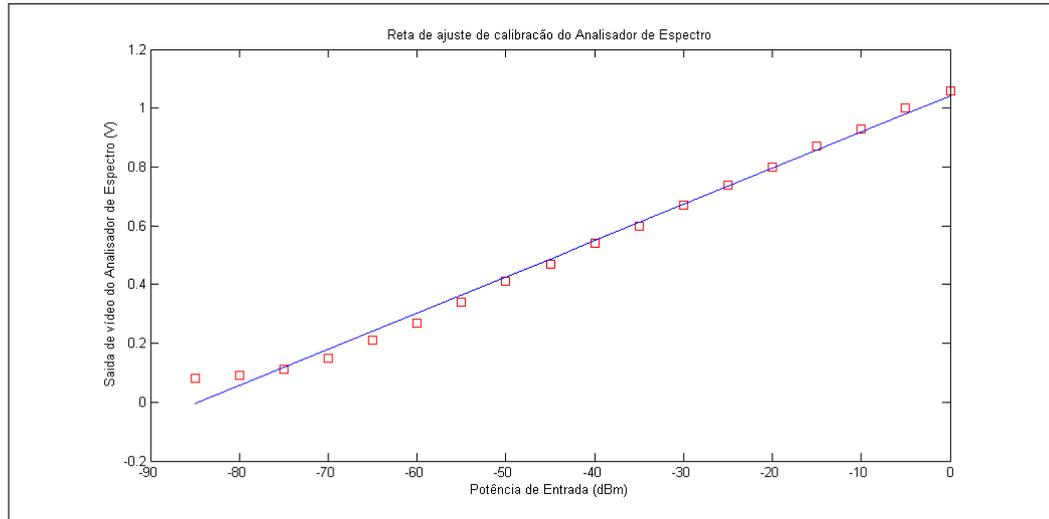


Figura 4.13: Curva de calibração do analisador de espectro para frequência de 1,88 GHz

Como pode ser observado na figura 4.13, o sistema apresenta uma resposta linear entre 0 dBm e -80 dBm. Esta foi a faixa dinâmica definida como adequada para a realização das medições.

Dentro desta faixa, foi encontrada, por regressão linear, a seguinte equação para reta que relaciona as grandezas envolvidas:

$$P_{dBm} = 80,53376V - 78,21243 \quad (4.6)$$

onde P_{dBm} é a potência em dBm e V , a tensão em volts.

4.4.3 Bloco de Aquisição e Armazenamento

Esse bloco é o responsável pela aquisição e armazenamento das medidas. Ele é composto, basicamente, de duas partes: o sensor de posição e a placa de aquisição propriamente dita, juntamente com o conjunto computador/*software*.

4.4.3.1 Sensor de Posição

Este componente foi responsável pelo controle espacial, sendo composto por três componentes: roda de bicicleta, circuito amostrador e um velocímetro de bicicleta.

- Roda de Bicicleta

Esse componente é formado por uma roda de bicicleta de raio de 20 polegadas, possuindo o aro desta roda segmentado em trechos obstruídos (segmento escuro) e desobstruídos (segmento claro). Como cada segmento do aro da roda (segmento claro ou escuro) possui o mesmo comprimento, e sendo a velocidade de deslocamento nas medições mantida constante durante toda a aquisição dos dados, pode-se associar as informações obtidas e armazenadas por meio do circuito amostrador e obter, com precisão, a distância percorrida associada ao nível de sinal medido em cada ponto.

- Circuito Amostrador

Esse componente tem a função de transformar a passagem de cada segmento do aro da roda da bicicleta (segmento escuro/obstruído ou claro/desobstruído da roda) em um trem de pulsos a ser aplicado à placa de aquisição de dados. O giro da roda de bicicleta aciona um interruptor óptico. Esse interruptor, consiste em um LED acoplado a um fototransistor. Durante a passagem de um segmento do aro da roda da bicicleta (segmento escuro da roda), o sinal do LED é interrompido. Nesta condição o circuito gera um nível TTL. Quando a passagem é desobstruída (segmento claro da roda), ou seja, o sinal do LED chega ao receptor óptico, é gerado um nível de 0 VDC. Esse circuito é alimentado por uma tensão de 12 VDC.

- Velocímetro de Bicicleta

Esse componente teve como função assegurar que a velocidade de deslocamento do automóvel se mantivesse constante durante toda a realização das medições. Como o velocímetro do automóvel não permite identificar velocidades inferiores a 20 km/h, e a velocidade definida para a aquisição dos dados foi, aproximadamente, a de um pedestre (7 km/h), utilizou-se o velocímetro de bicicleta acoplado à roda da bicicleta para assegurar a velocidade de 7 km/h definida para a realização das medições. Esse

dispositivo é alimentado por uma bateria interna de 1.5 VDC. As figuras 4.14 (a) e (b) ilustram componentes do sensor de posição utilizado.



(a) Foto da roda de bicicleta montada no veículo



(b) Foto do velocímetro de bicicleta utilizado

Figura 4.14: Componentes do sensor de posição

4.4.3.2 Placa de Aquisição

A placa de aquisição utilizada foi a DAQ Card-AI-16XE-50, com taxa máxima de 200 KSPS, da National Instruments. A especificação mais importante para a placa é sua taxa de aquisição. A taxa de aquisição deve permitir acompanhar, com folga, a produção de pulsos pela saída de vídeo do analisador de espectro, assim como os gerados pelo sensor de posição (roda de bicicleta), com a movimentação do automóvel. Como há necessidade de adquirir somente dois sinais (i.e., a saída de vídeo do analisador e o sinal do circuito amostrador), a placa deve operar apenas com duas entradas analógicas. Isso simplifica o *software* de tratamento dos dados e possibilita a utilização de uma placa de baixo custo. A placa de aquisição de dados recebe, na entrada, os sinais provenientes da saída de vídeo do analisador de espectro e do sensor de posição e fornece, na saída, um sinal digital a ser armazenado na memória do computador.

O computador utilizado foi um *laptop* Toshiba, com processador *Celeron* e 512 MB de RAM. Cabe salientar que pode ser utilizado qualquer modelo, de acordo com a disponibilidade, sendo necessário somente que o computador possua uma entrada compatível com o tipo de placa de aquisição utilizada para a realização das medições. Neste caso em questão, o computador necessitou ter uma entrada DAQ para atender à especificação de interface da placa de aquisição. Quanto ao *software* de controle do sistema, sua função é

recolher as amostras coletadas pela placa de aquisição de dados e registrar seus valores em arquivos que permitam seu futuro processamento. O *software* de aquisição utilizado teve como base o aplicativo desenvolvido por Vieira [49], para o estudo que fez sobre a análise da resposta em banda estreita em um canal marítimo na faixa de 3,5 GHz, efetuando-se algumas modificações necessárias para atender a aquisição dos dados provenientes do sensor de posição (roda de bicicleta) adotado neste estudo.

4.5 Alimentação dos Blocos de Recepção, Aquisição e Armazenamento

A energia para alimentar os equipamentos do sistema receptor, bem como do bloco de aquisição e armazenamento foram providas por um *Nobreak*, que possui uma entrada de 12 VDC. O *Nobreak* em questão alimentou tanto as partes do sistema que funcionam em corrente contínua (DC), como os componentes em corrente alternada (AC). A fonte de alimentação do amplificador de baixo ruído (LNA) e do circuito amostrador funcionam em DC, enquanto que o analisador de espectro e o computador portátil funcionam em AC. Neste caso, o *Nobreak* foi interligado, através da sua entrada de 12 VDC, à bateria do automóvel utilizado na sondagem. A bateria do automóvel, era carregada pelo alternador do veículo à medida que o veículo se movimentava, que por sua vez, alimentava o *Nobreak* e este alimentava os componentes do sistema receptor e do bloco de aquisição e armazenamento. O esquema adotado foi auto-suficiente com relação ao suprimento de energia e propiciou a autonomia adequada durante toda campanha de medições. Vale ressaltar que antes do início da realização das medições, verificou-se a influência de possíveis interferências do sistema de alimentação nos equipamentos do bloco receptor e de aquisição e análise, não sendo sido identificada interferência considerável.

4.6 Sumário

Neste capítulo foram apresentados tanto o ambiente como o *set-up* utilizado para a sondagem em faixa estreita, contendo a descrição de cada rota percorrida no ambiente, além da descrição detalhada de todos os equipamentos que compõem cada bloco do *set-up* de medições e as configurações de todos os equipamentos usados neste *set-up*.

Na seção de procedimentos, foram detalhados os parâmetros relevantes para a realização da sondagem. Além disso, definiu-se a taxa de amostragem necessária capaz de capturar desvanecimentos profundos.

Capítulo 5

Resultados

Este capítulo possui, como objetivo, expor os resultados da análise estatística de variabilidade do sinal, apresentando a comparação entre as distribuições mais comumente utilizadas para descrever a variação de grande escala e de pequena escala de um sinal desvanecido, de forma a obter a que melhor se ajuste para descrever cada tipo de variação do ambiente de medida estudado.

Além das distribuições, são apresentados também, as estatísticas de segunda ordem, como taxa de cruzamento de nível e duração média de desvanecimento associadas as distribuições.

Os resultados são apresentados por meio de gráficos e de tabelas, contendo o teste do qui-quadrado, realizado para atestar a adequação das distribuições às medidas.

5.1 Preparação dos Dados

Antes da análise estatística propriamente dita, é necessário desmembrar cada fator que compõe o sinal recebido, de forma a analisá-los separadamente. Conforme descrito no capítulo 2, os resultados das medições realizadas em campo mostram que a envoltória do sinal recebido, para uma excitação em banda estreita, exhibe três escalas de variação espacial: variação de pequena escala, devido à propagação de múltiplos percursos, a variação de larga escala, devido as variações topográficas e edificações, e a dependência com a distância. Matematicamente, pode-se expressar essa característica, em decibéis, da seguinte forma:

$$S(t) = M(t) + R(t) \quad (5.1)$$

onde $S(t)$ é o sinal recebido, medido em campo, $M(t)$ é a média local, que corresponde a variação de larga escala acrescido da dependência com a distância, e $R(t)$ é a variação de pequena escala.

Nas medições realizadas em campo foi obtido $S(t)$. Para separar $M(t)$ de $R(t)$, de acordo com Yacoub [19], pode-se fazer o fator $M(t)$ variar lentamente em comparação com $R(t)$. Desse modo, aplica-se um processo de filtragem passa baixas em $S(t)$, e obtém-se $M(t)$. Em seguida, subtrai o fator, $R(t) = S(t) - M(t)$, para extrair $R(t)$. Este processo de filtragem passa baixas de $S(t)$ pode ser executado fazendo com que para cada amostra sua seja feita a média de $2K + 1$ amostras adjacentes (sendo K um número inteiro), entre as quais não haja variação perceptível na média. A este processo de filtragem, denomina-se média móvel ou janela deslizando. Matematicamente, pode-se expressar este processo pela equação (5.2):

$$\hat{M}_i(t) = \frac{1}{2k + 1} \sum_{j=-k}^k S_{i+j} \quad (5.2)$$

na qual k é o número de amostras dentro da qual será calculada a média, S_i é a i -ésima amostra do sinal recebido recolhida e M_i é a i -ésima média local estimada compreendendo o conjunto de amostras ente k e $-k$.

Desse modo, o sinal de desvanecimento rápido estimado (\hat{R}_i) é dado por:

$$\hat{R}_i(t) = S_i - \hat{M}_i \quad (5.3)$$

Nesse processo de filtragem uma definição muito importante é o tamanho da janela de $2k + 1$ amostras, pois, caso ela seja muito pequena, introduzirá grandes erros no processo de amostragem. Urei [50], mostra que tamanhos de janela inferiores a 5 comprimentos de onda introduzem erros inaceitáveis, que geram uma super estimativa dos efeitos de sombreamento. Por outro lado, caso o tamanho das janelas seja muito grande, a média do sinal pode não permanecer constante dentro dela, o que ocasionará perda da variação de larga escala do sinal. Considerando esses dois aspectos, Lee [52] propõe

limites, onde se conclui que é adequado o tamanho de janela entre 20 e 40 comprimentos de onda.

Sendo assim, foram realizados testes com tamanhos de janelas variando de 20 a 40 comprimentos de onda para filtrar os arquivos obtidos na medições de campo. O objetivo dos testes foi definir qual opção resultava em um gráfico da variação de larga escala mais próximo do esperado, no qual fossem mais bem filtradas as variações de pequena escala do sinal e preservadas as variações de larga escala.

Os testes resultaram na escolha da opção de 30 comprimentos de onda, por ter sido a mais adequada para as rotas existentes no ambiente de medições. Janelas menores que estas resultaram em arquivos que não filtraram totalmente a variação de pequena escala. Já com janelas maiores, as variações de larga escala começaram a ser perdidas.

5.2 Análise da Variabilidade de Pequena Escala do Sinal

O estudo da variabilidade de pequena escala do sinal é realizado a partir da análise do sinal em uma pequena área ou setor, onde a variação de larga escala é praticamente constante. Para cada um dos setores analisados, calculou-se a função densidade de probabilidade (fdp) dos valores medidos e se comparou com as fdps teóricas de Gauss, Rayleigh, Rice, Nakagami-m e $\alpha - \mu$, de modo a verificar qual apresenta melhor ajuste. Feitos estes cálculos, para examinar a distribuição teórica que melhor se enquadra aos valores medidos, foi escolhido o teste qui-quadrado [51].

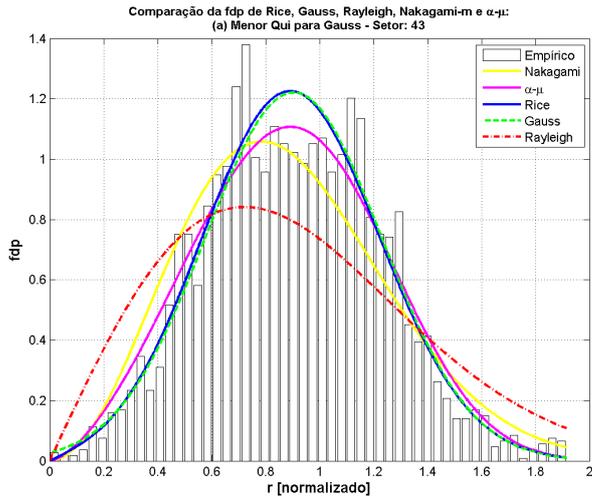
Os resultados para o setor que melhor ajuste apresentou pelo teste do qui-quadrado, considerando cada uma das fdps, para cada uma das rotas, são apresentados.

Além dos gráficos, elaborou-se uma tabela para cada rota, contendo o resumo das informações relevantes, a fim de facilitar a identificação da fdp que melhor se ajustou e seus parâmetros principais. A tabela de cada rota, considerando todos os seus setores, apresentam os seguintes dados:

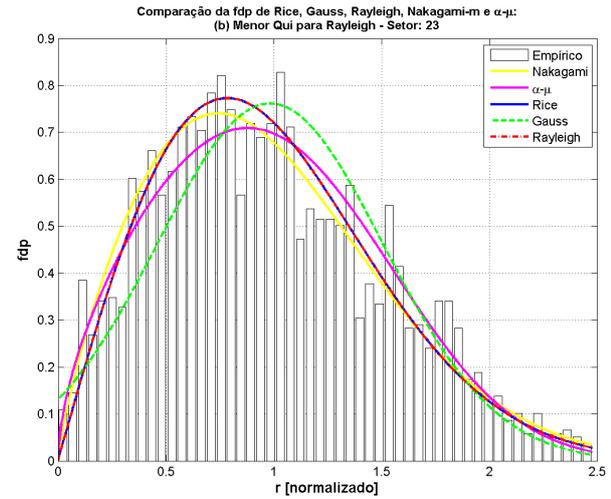
- Quantidade de setores existentes em cada rota;
- número da rota sob análise;

- quantidade de vezes que as fdps de Gauss, Rayleigh, Rice, Nakagami e $\alpha - \mu$ passaram no teste qui-quadrado;
- quantidade de vezes que as fdps de Gauss, Rayleigh, Rice, Nakagami e $\alpha - \mu$ passaram no teste qui-quadrado com o menor valor, comparado às demais distribuições, indicando a distribuição com melhor aderência;
- maior e menor valor do parâmetro K da fdp de Rice e do teste qui-quadrado, considerando somente os que passaram no teste;
- valor do parâmetro K da fdp de Rice: mínimo e máximo;
- maior e menor valor do valor do parâmetro m da fdp de Nakagami e do teste qui-quadrado, considerando somente os que passaram no teste;
- valor do parâmetro m da fdp de Nakagami: mínimo e máximo;
- maior e menor valor do parâmetro α da fdp de $\alpha - \mu$ e do teste qui-quadrado, considerando somente os que passaram no teste;
- valor do parâmetro α da fdp de $\alpha - \mu$: mínimo e máximo;
- menor e maior valor do teste qui-quadrado, considerando somente os que passaram no teste, para cada fdp;
- análise da qualidade do ajuste pelo teste qui-quadrado para cada fdp, considerando a quantidade de vezes que:
 - cada fdp passou exclusivamente, ou seja, sem que nenhuma outra tenha passado;
 - nenhuma fdp passou;
 - todas as fdps passaram no teste ao mesmo tempo.

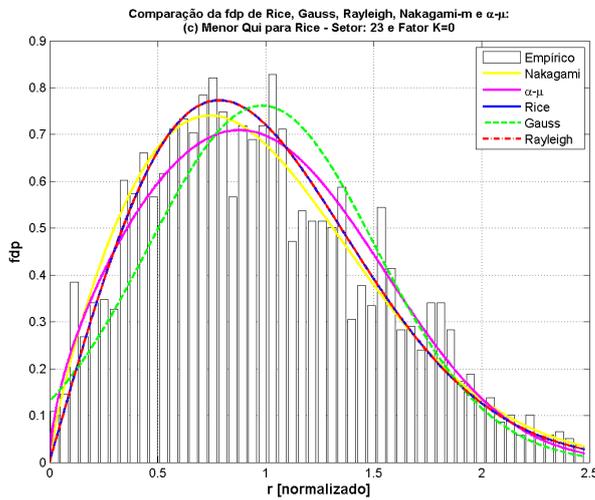
Nas figuras 5.1 a 5.7, visando mostrar uma comparação entre todas as distribuições sob análise, são apresentados os resultados para o setor de cada rota onde cada distribuição teve o melhor ajuste pelo teste do qui-quadrado. Já nas tabelas 5.1 a 5.7 são exibidos o resumo das informações relevantes de cada rota.



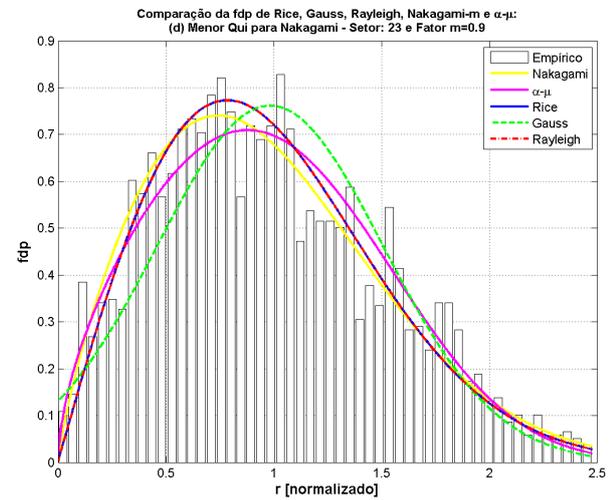
(a) Menor qui-quadrado para fdp de Gauss



(b) Menor qui-quadrado para fdp de Rayleigh



(c) Menor qui-quadrado para fdp de Rice



(d) Menor qui-quadrado para fdp de Nakagami-m

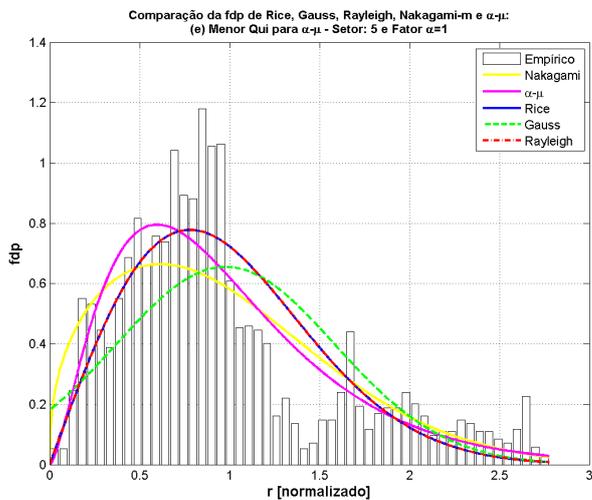
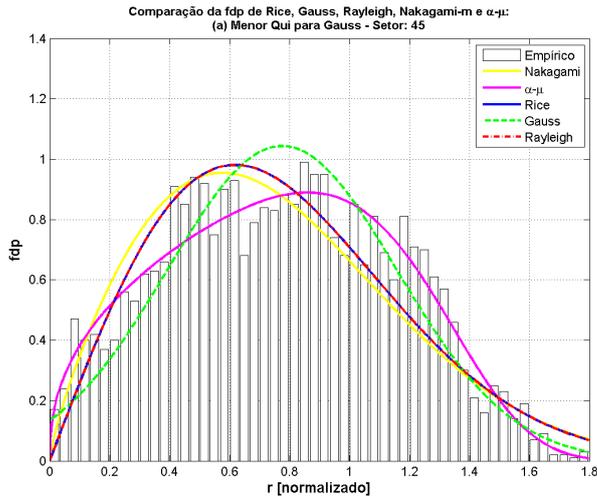
(e) Menor qui-quadrado para fdp $\alpha - \mu$

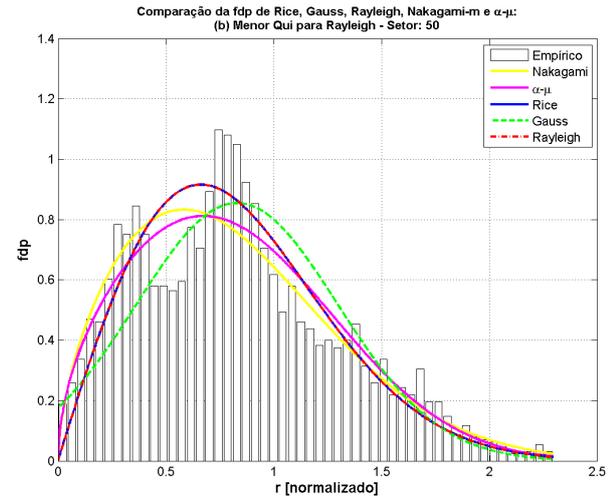
Figura 5.1: Setor que apresentou o melhor ajuste pelo teste qui-quadrado para cada fdp na rota 1

Tabela 5.1: Resumo dos valores encontrados para a rota 1

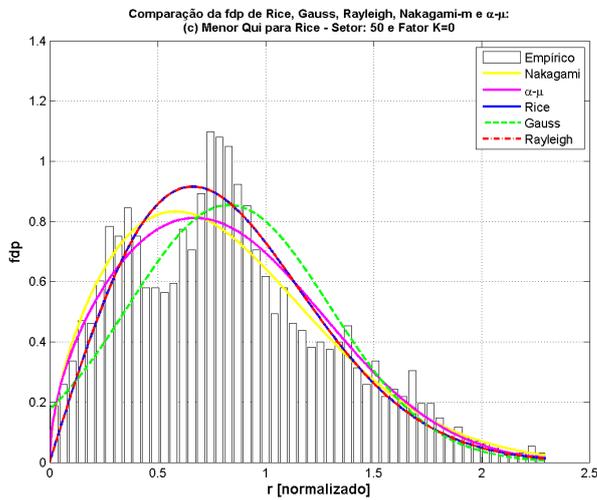
Rota: 1 Quantidade total de setores na rota: 44					
Quant. de vezes que a fdp passou no teste Qui:	Gauss	Ray	Rice	Nak	$\alpha - \mu$
Total fdp que passou no teste Qui (95%):	44	44	44	44	44
Quantidade de vezes que a fdp passou no teste Qui com menor valor					
	Gauss	Ray	Rice	Nak	$\alpha - \mu$
Total com menor valor Qui:	11	2	11	3	19
Maior e menor valor de K e QUI que passou no teste					
Menor valor de K: 0.00 para QUI: 9.62					
Maior valor de K: 4.00 para QUI: 8.80					
Valor de K: 0.00 para menor QUI: 1.08					
Valor de K: 2.00 para maior QUI: 19.79					
Valor de K da fdp de Rice: mínimo máximo					
0.00 4.00					
Maior e menor valor de m e QUI que passou no teste					
Menor valor de m: 0.70 para QUI: 5.13					
Maior valor de m: 1.50 para QUI: 2.57					
Valor de m: 0.90 para menor QUI: 0.80					
Valor de m: 1.30 para maior QUI: 29.34					
Valor de m da fdp de Nakagami: mínimo máximo					
0.70 1.50					
Maior e menor valor de α e QUI que passou no teste					
Menor valor de α : 1.00 para QUI: 4.13					
Maior valor de α : 19.40 para QUI: 9.04					
Valor de α : 3.00 para menor QUI: 0.83					
Valor de α : 4.60 para maior QUI: 16.62					
Valor de α da fdp de $\alpha - \mu$: mínimo máximo					
1.00 19.40					
Menor e maior valor de Qui para cada fdp:					
	Gauss	Ray	Rice	Nak	$\alpha - \mu$
Menor QUI:	1.53	1.08	1.08	0.80	0.83
Maior QUI:	17.44	39.68	19.79	29.34	16.62
Qualidade de ajuste pelo teste Qui para cada fdp:					
	Gauss	Ray	Rice	Nak	$\alpha - \mu$
Passou exclusivamente:	0	0	0	0	0
Nenhuma fdp passou:	0	0	0	0	0
Todas passaram ao mesmo tempo:	44	44	44	44	44



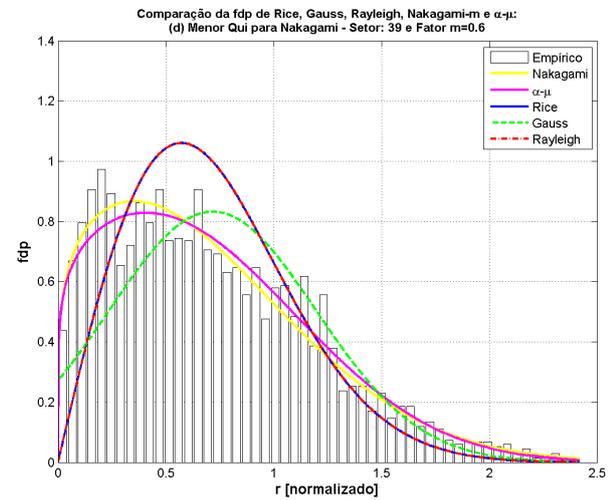
(a) Menor qui-quadrado para fdp de Gauss



(b) Menor qui-quadrado para fdp de Rayleigh



(c) Menor qui-quadrado para fdp de Rice



(d) Menor qui-quadrado para fdp de Nakagami-m

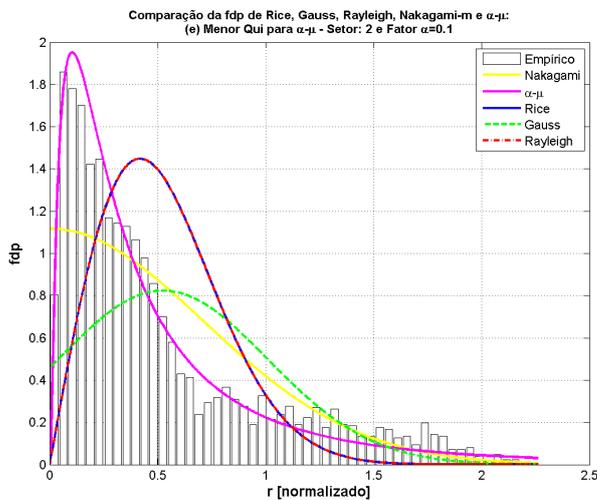
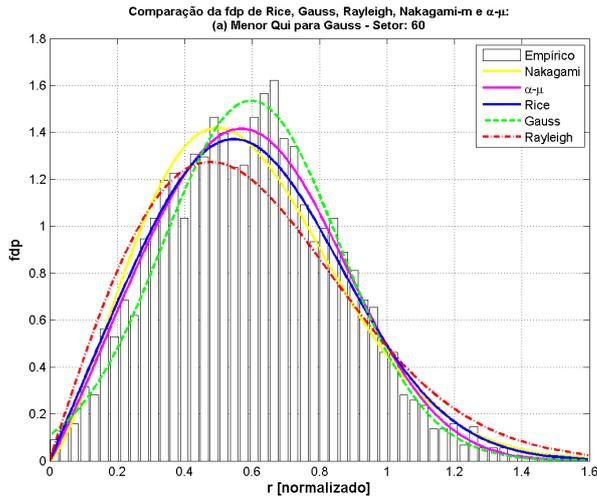
(e) Menor qui-quadrado para fdp $\alpha - \mu$

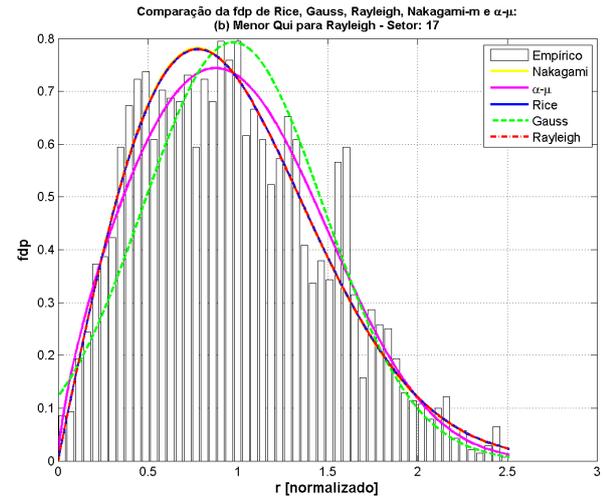
Figura 5.2: Setor que apresentou o melhor ajuste pelo teste qui-quadrado para cada fdp na rota 2

Tabela 5.2: Resumo dos valores encontrados para a rota 2

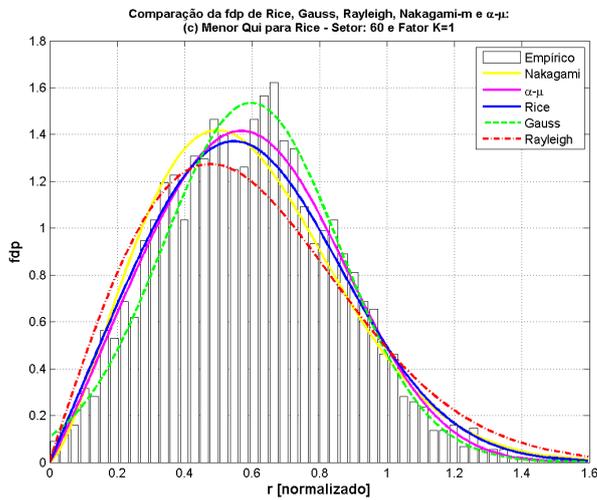
Rota: 2 Quantidade total setores na rota: 56					
Quant. de vezes que a fdp passou no teste Qui:	Gauss	Ray	Rice	Nak	$\alpha - \mu$
Total fdp que passou no teste Qui (95%):	34	38	38	52	56
Quantidade de vezes que a fdp passou no teste Qui com menor valor					
	Gauss	Ray	Rice	Nak	$\alpha - \mu$
Total com menor valor Qui:	0	2	2	9	45
Maior e menor valor de K e QUI que passou no teste					
Menor valor de K: 0.00 para QUI: 13.27					
Maior valor de K: 1.00 para QUI: 16.62					
Valor de K: 0.00 para menor QUI: 1.99					
Valor de K: 0.00 para maior QUI: 48.10					
Valor de K da fdp de Rice: mínimo máximo					
0.00 1.00					
Maior e menor valor de m e QUI que passou no teste					
Menor valor de m: 0.50 para QUI: 4.55					
Maior valor de m: 1.10 para QUI: 1.17					
Valor de m: 0.60 para menor QUI: 0.56					
Valor de m: 0.50 para maior QUI: 68.59					
Valor de m da fdp de Nakagami: mínimo máximo					
0.50 1.10					
Maior e menor valor de α e QUI que passou no teste					
Menor valor de α : 0.10 para QUI: 1.78					
Maior valor de α : 10.10 para QUI: 3.16					
Valor de α : 2.40 para menor QUI: 0.57					
Valor de α : 2.00 para maior QUI: 33.33					
Valor de α da fdp de $\alpha - \mu$: mínimo máximo					
0.10 10.10					
Menor e maior valor de Qui para cada fdp:					
Menor QUI:	Gauss	Ray	Rice	Nak	$\alpha - \mu$
	1.93	1.99	1.99	0.56	0.57
Maior QUI:	49.64	48.10	48.10	68.59	33.33
Qualidade de ajuste pelo teste Qui para cada fdp:					
Passou exclusivamente:	Gauss	Ray	Rice	Nak	$\alpha - \mu$
	0	0	0	0	4
Nenhuma fdp passou:	0	0	0	0	0
Todas passaram ao mesmo tempo:	33	33	33	33	33



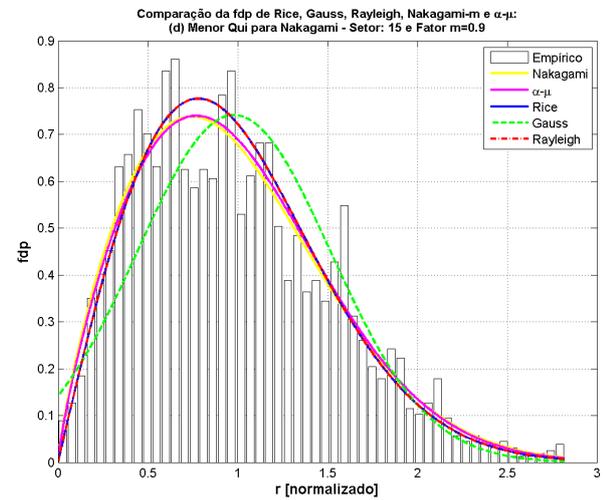
(a) Menor qui-quadrado para fdp de Gauss



(b) Menor qui-quadrado para fdp de Rayleigh



(c) Menor qui-quadrado para fdp de Rice



(d) Menor qui-quadrado para fdp de Nakagami-m

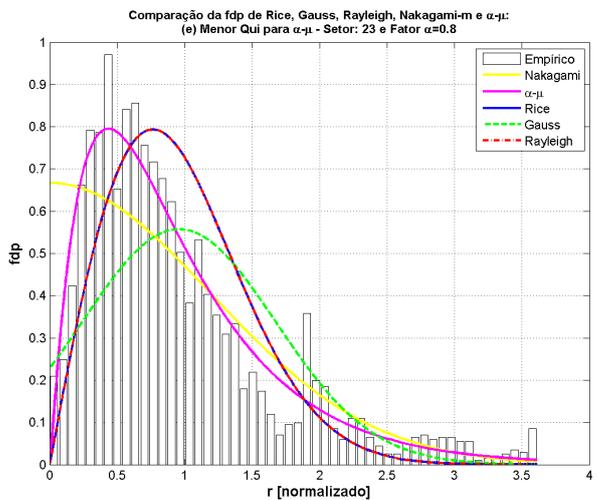
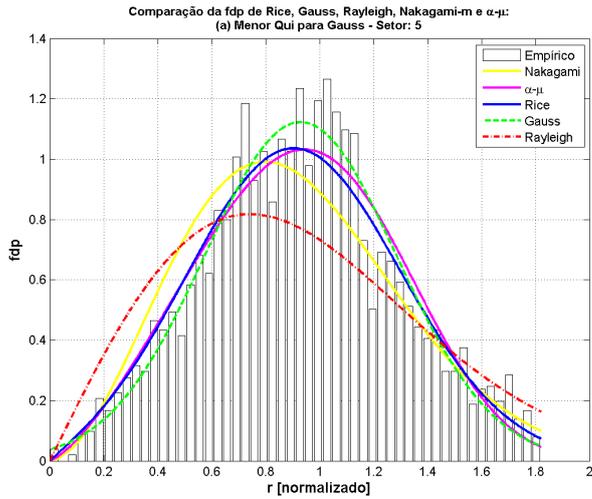
(e) Menor qui-quadrado para fdp $\alpha - \mu$

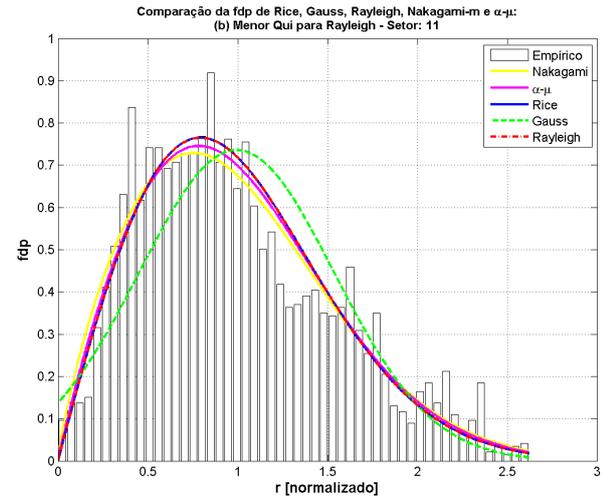
Figura 5.3: Setor que apresentou o melhor ajuste pelo teste qui-quadrado para cada fdp na rota 3

Tabela 5.3: Resumo dos valores encontrados para a rota 3

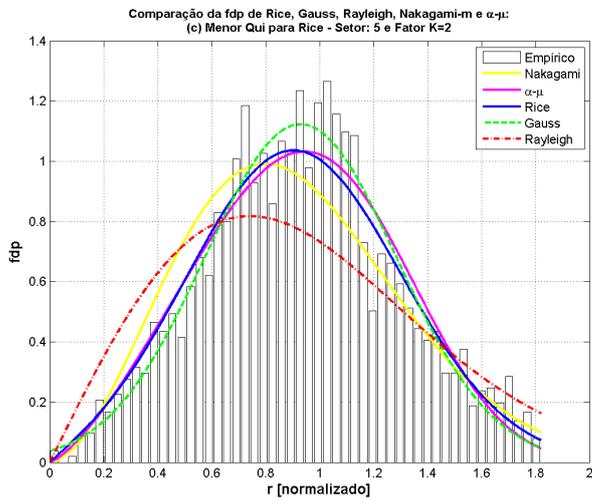
Rota: 3 Quantidade total setores na rota: 65					
Quant. de vezes que a fdp passou no teste Qui:	Gauss	Ray	Rice	Nak	$\alpha - \mu$
Total fdp que passou no teste Qui (95%):	65	64	64	65	65
Quantidade de vezes que a fdp passou no teste Qui com menor valor					
	Gauss	Ray	Rice	Nak	$\alpha - \mu$
Total com menor valor Qui:	9	4	16	10	30
Maior e menor valor de K e QUI que passou no teste					
Menor valor de K: 0.00 para QUI: 2.87					
Maior valor de K: 5.00 para QUI: 18.86					
Valor de K: 1.00 para menor QUI: 0.86					
Valor de K: 0.00 para maior QUI: 54.20					
Valor de K da fdp de Rice: mínimo máximo					
0.00 5.00					
Maior e menor valor de m e QUI que passou no teste					
Menor valor de m: 0.50 para QUI: 1.72					
Maior valor de m: 1.80 para QUI: 8.62					
Valor de m: 0.90 para menor QUI: 0.77					
Valor de m: 1.40 para maior QUI: 17.93					
Valor de m da fdp de Nakagami: mínimo máximo					
0.50 1.80					
Maior e menor valor de α e QUI que passou no teste					
Menor valor de α : 0.80 para QUI: 1.69					
Maior valor de α : 15.30 para QUI: 4.71					
Valor de α : 1.50 para menor QUI: 0.58					
Valor de α : 6.00 para maior QUI: 7.66					
Valor de α da fdp de $\alpha - \mu$: mínimo máximo					
0.80 15.30					
Menor e maior valor de Qui para cada fdp:					
	Gauss	Ray	Rice	Nak	$\alpha - \mu$
Menor QUI:	0.98	0.94	0.86	0.77	0.58
Maior QUI:	30.05	54.20	54.20	17.93	7.66
Qualidade de ajuste pelo teste Qui para cada fdp:					
	Gauss	Ray	Rice	Nak	$\alpha - \mu$
Passou exclusivamente:	0	0	0	0	0
Nenhuma fdp passou:	0	0	0	0	0
Todas passaram ao mesmo tempo:	64	64	64	64	64



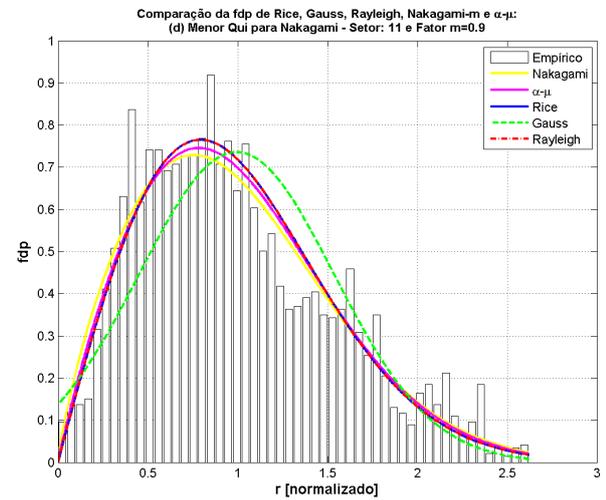
(a) Menor qui-quadrado para fdp de Gauss



(b) Menor qui-quadrado para fdp de Rayleigh



(c) Menor qui-quadrado para fdp de Rice



(d) Menor qui-quadrado para fdp de Nakagami-m

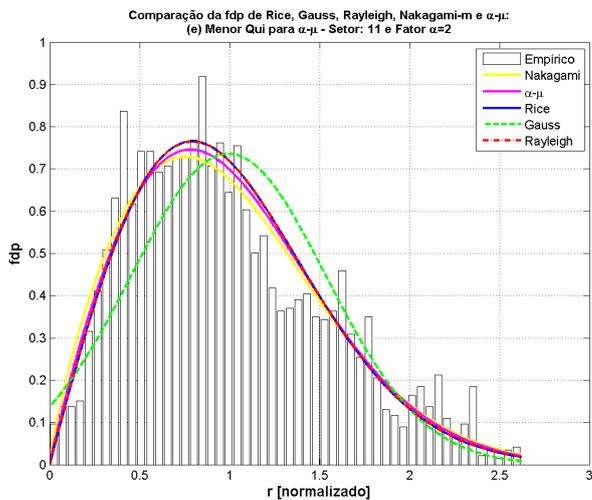
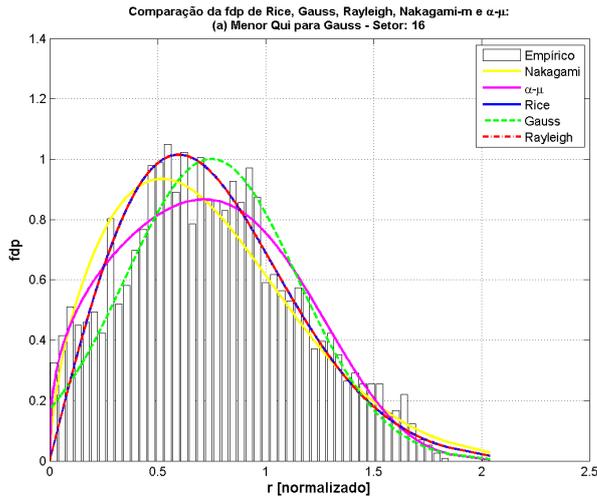
(e) Menor qui-quadrado para fdp $\alpha - \mu$

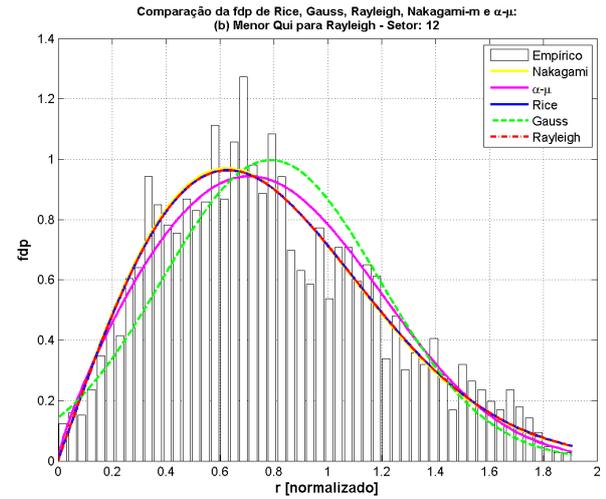
Figura 5.4: Setor que apresentou o melhor ajuste pelo teste qui-quadrado para cada fdp na rota 4

Tabela 5.4: Resumo dos valores encontrados para a rota 4

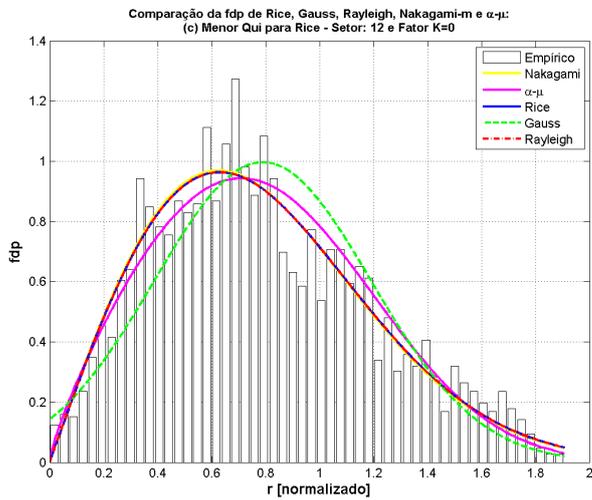
Rota: 4 Quantidade total setores na rota: 52					
Quant. de vezes que a fdp passou no teste Qui:	Gauss	Ray	Rice	Nak	$\alpha - \mu$
Total fdp que passou no teste Qui (95%):	52	52	52	52	52
Quantidade de vezes que a fdp passou no teste Qui com menor valor					
	Gauss	Ray	Rice	Nak	$\alpha - \mu$
Total com menor valor Qui:	20	0	13	2	17
Maior e menor valor de K e QUI que passou no teste					
Menor valor de K: 0.00 para QUI: 1.58					
Maior valor de K: 4.00 para QUI: 5.56					
Valor de K: 2.00 para menor QUI: 1.10					
Valor de K: 2.00 para maior QUI: 28.94					
Valor de K da fdp de Rice: mínimo máximo					
0.00 4.00					
Maior e menor valor de m e QUI que passou no teste					
Menor valor de m: 0.70 para QUI: 9.57					
Maior valor de m: 1.40 para QUI: 17.39					
Valor de m: 0.90 para menor QUI: 1.28					
Valor de m: 1.00 para maior QUI: 43.31					
Valor de m da fdp de Nakagami: mínimo máximo					
0.70 1.40					
Maior e menor valor de α e QUI que passou no teste					
Menor valor de α : 2.00 para QUI: 1.37					
Maior valor de α : 30.00 para QUI: 6.39					
Valor de α : 8.20 para menor QUI: 1.21					
Valor de α : 2.20 para maior QUI: 18.90					
Valor de α da fdp de $\alpha - \mu$: mínimo máximo					
2.00 30.00					
Menor e maior valor de Qui para cada fdp:					
Menor QUI:	Gauss	Ray	Rice	Nak	$\alpha - \mu$
	1.38	1.58	1.10	1.28	1.21
Maior QUI:	34.61	49.18	28.94	43.31	18.90
Qualidade de ajuste pelo teste Qui para cada fdp:					
Passou exclusivamente:	Gauss	Ray	Rice	Nak	$\alpha - \mu$
	0	0	0	0	0
Nenhuma fdp passou:	0	0	0	0	0
Todas passaram ao mesmo tempo:	52	52	52	52	52



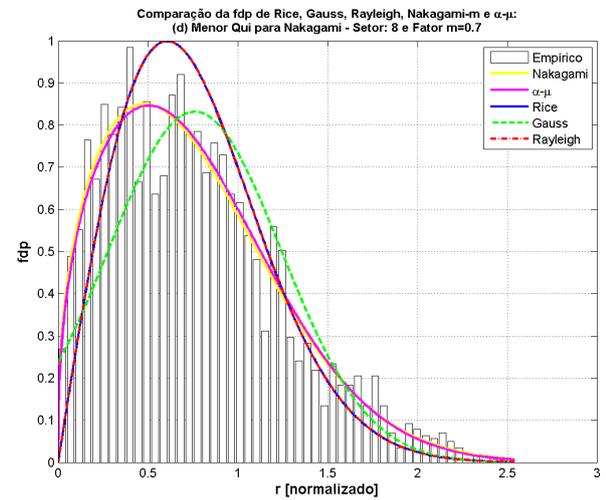
(a) Menor qui-quadrado para fdp de Gauss



(b) Menor qui-quadrado para fdp de Rayleigh



(c) Menor qui-quadrado para fdp de Rice



(d) Menor qui-quadrado para fdp de Nakagami-m

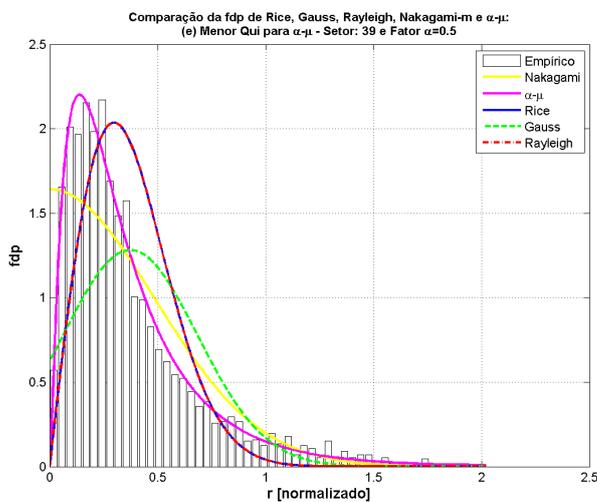
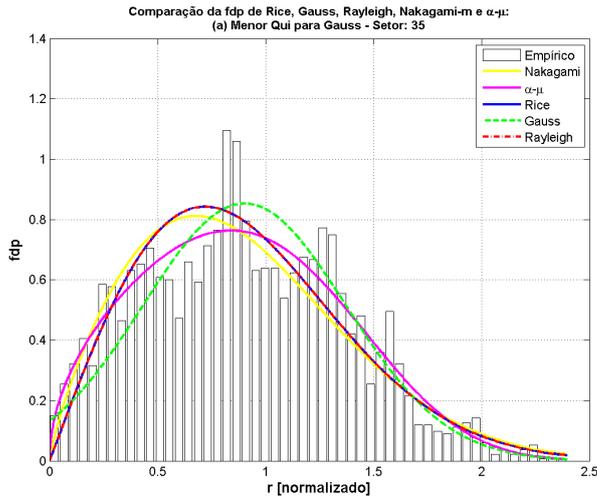
(e) Menor qui-quadrado para fdp $\alpha - \mu$

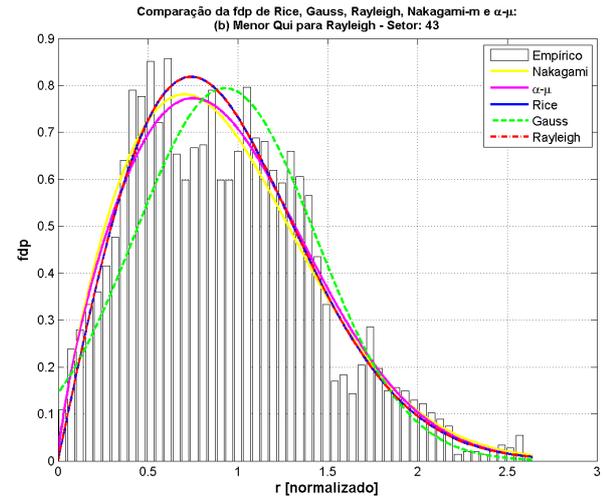
Figura 5.5: Setor que apresentou o melhor ajuste pelo teste qui-quadrado para cada fdp na rota 5

Tabela 5.5: Resumo dos valores encontrados para a rota 5

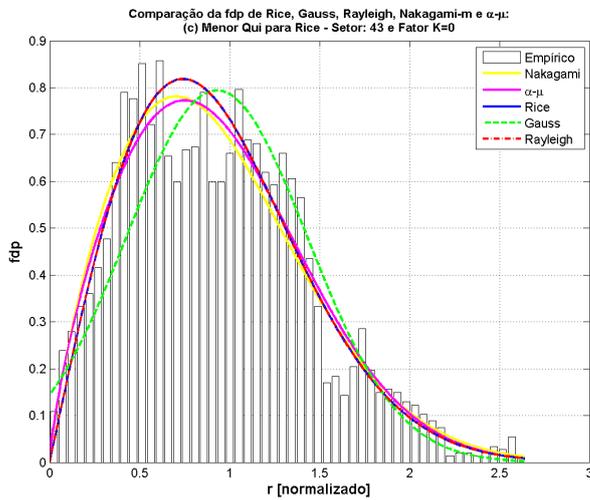
Rota: 5 Quantidade total setores na rota: 44					
Quant. de vezes que a fdp passou no teste Qui:	Gauss	Ray	Rice	Nak	$\alpha - \mu$
Total fdp que passou no teste Qui (95%):	41	37	37	44	44
Quantidade de vezes que a fdp passou no teste Qui com menor valor					
	Gauss	Ray	Rice	Nak	$\alpha - \mu$
Total com menor valor Qui:	1	0	1	9	33
Maior e menor valor de K e QUI que passou no teste					
Menor valor de K: 0.00 para QUI: 4.86					
Maior valor de K: 2.00 para QUI: 2.82					
Valor de K: 0.00 para menor QUI: 1.18					
Valor de K: 0.00 para maior QUI: 37.95					
Valor de K da fdp de Rice: mínimo máximo					
0.00 2.00					
Maior e menor valor de m e QUI que passou no teste					
Menor valor de m: 0.50 para QUI: 3.23					
Maior valor de m: 1.20 para QUI: 4.95					
Valor de m: 0.70 para menor QUI: 0.69					
Valor de m: 0.50 para maior QUI: 5.22					
Valor de m da fdp de Nakagami: mínimo máximo					
0.50 1.20					
Maior e menor valor de α e QUI que passou no teste					
Menor valor de α : 0.50 para QUI: 0.79					
Maior valor de α : 8.20 para QUI: 1.86					
Valor de α : 1.40 para menor QUI: 0.61					
Valor de α : 4.90 para maior QUI: 3.01					
Valor de α da fdp de $\alpha - \mu$: mínimo máximo					
0.50 8.20					
Menor e maior valor de Qui para cada fdp:					
Menor QUI:	Gauss	Ray	Rice	Nak	$\alpha - \mu$
	1.80	1.18	1.18	0.69	0.61
Maior QUI:	34.58	37.95	37.95	5.22	3.01
Qualidade de ajuste pelo teste Qui para cada fdp:					
Passou exclusivamente:	Gauss	Ray	Rice	Nak	$\alpha - \mu$
	0	0	0	0	0
Nenhuma fdp passou:	0	0	0	0	0
Todas passaram ao mesmo tempo:	37	37	37	37	37



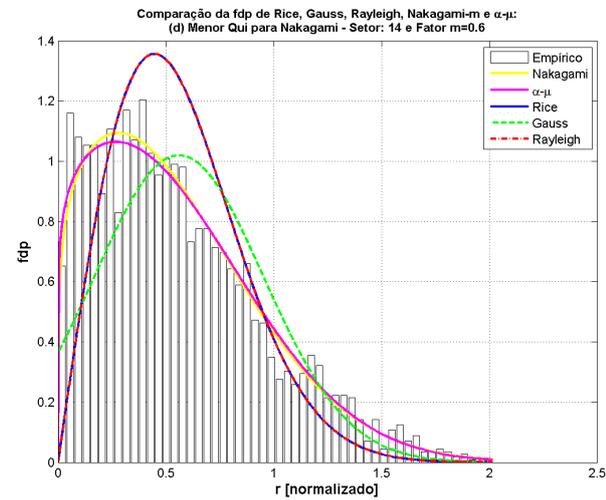
(a) Menor qui-quadrado para fdp de Gauss



(b) Menor qui-quadrado para fdp de Rayleigh



(c) Menor qui-quadrado para fdp de Rice



(d) Menor qui-quadrado para fdp de Nakagami-m

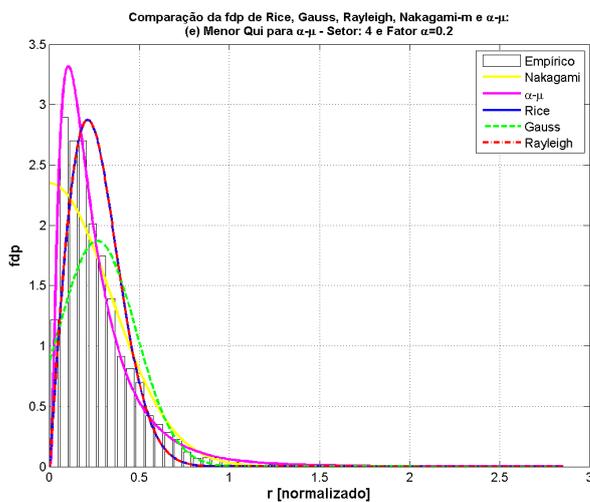
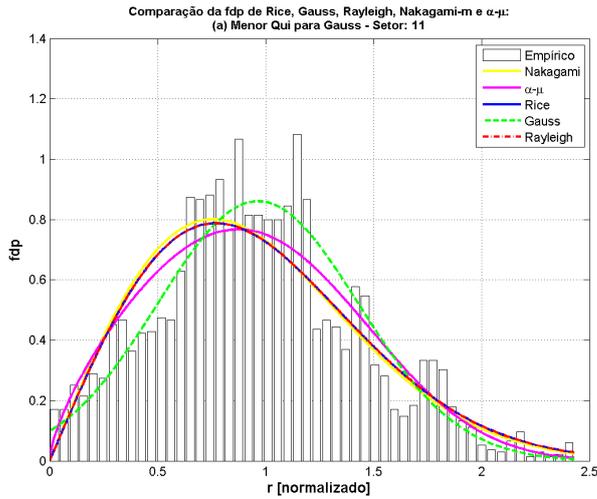
(e) Menor qui-quadrado para fdp $\alpha - \mu$

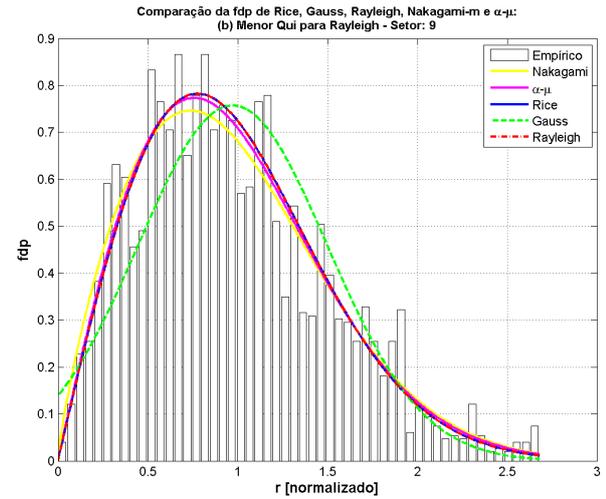
Figura 5.6: Setor que apresentou o melhor ajuste pelo teste qui-quadrado para cada fdp na rota 6

Tabela 5.6: Resumo dos valores encontrados para a rota 6

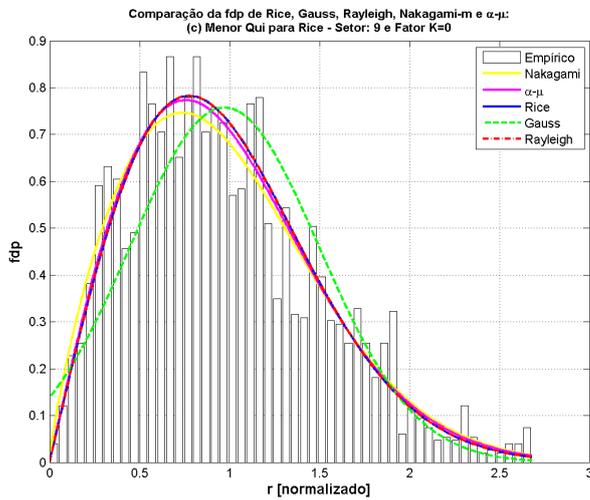
Rota: 6 Quantidade total setores na rota: 47					
Quant. de vezes que a fdp passou no teste Qui:	Gauss	Ray	Rice	Nak	$\alpha - \mu$
Total fdp que passou no teste Qui (95%):	36	36	36	42	47
Quantidade de vezes que a fdp passou no teste Qui com menor valor					
	Gauss	Ray	Rice	Nak	$\alpha - \mu$
Total com menor valor Qui:	0	0	1	13	33
Maior e menor valor de K e QUI que passou no teste					
Menor valor de K: 0.00 para QUI: 451815962.88					
Maior valor de K: 0.00 para QUI: 451815962.88					
Valor de K: 0.00 para menor QUI: 1.14					
Valor de K: 0.00 para maior QUI: 31.54					
Valor de K da fdp de Rice: mínimo máximo					
0.00 0.00					
Maior e menor valor de m e QUI que passou no teste					
Menor valor de m: 0.50 para QUI: 35.24					
Maior valor de m: 0.90 para QUI: 1.06					
Valor de m: 0.60 para menor QUI: 0.66					
Valor de m: 0.50 para maior QUI: 36.81					
Valor de m da fdp de Nakagami: mínimo máximo					
0.50 0.90					
Maior e menor valor de α e QUI que passou no teste					
Menor valor de α : 0.20 para QUI: 0.68					
Maior valor de α : 11.20 para QUI: 3.22					
Valor de α : 0.50 para menor QUI: 0.50					
Valor de α : 3.20 para maior QUI: 5.42					
Valor de α da fdp de $\alpha - \mu$: mínimo máximo					
0.20 11.20					
Menor e maior valor de Qui para cada fdp:					
Menor QUI:	Gauss	Ray	Rice	Nak	$\alpha - \mu$
Maior QUI:	1.88	1.14	1.14	0.66	0.50
	18.04	31.54	31.54	36.81	5.42
Qualidade de ajuste pelo teste Qui para cada fdp:					
Passou exclusivamente:	Gauss	Ray	Rice	Nak	$\alpha - \mu$
Nenhuma fdp passou:	0	0	0	0	5
Todas passaram ao mesmo tempo:	0	0	0	0	0
	36	36	36	36	36



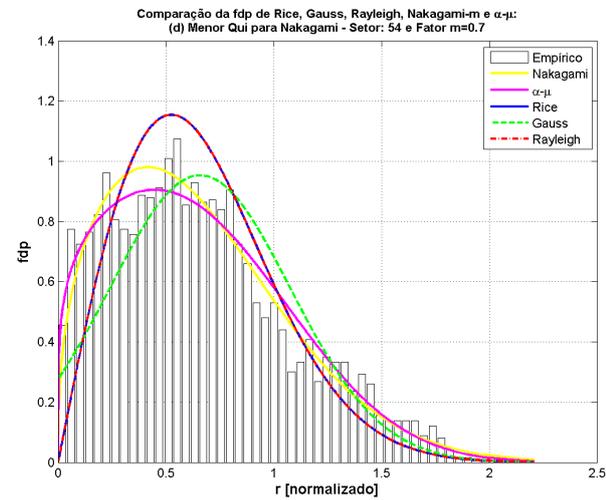
(a) Menor qui-quadrado para fdp de Gauss



(b) Menor qui-quadrado para fdp de Rayleigh



(c) Menor qui-quadrado para fdp de Rice



(d) Menor qui-quadrado para fdp de Nakagami-m

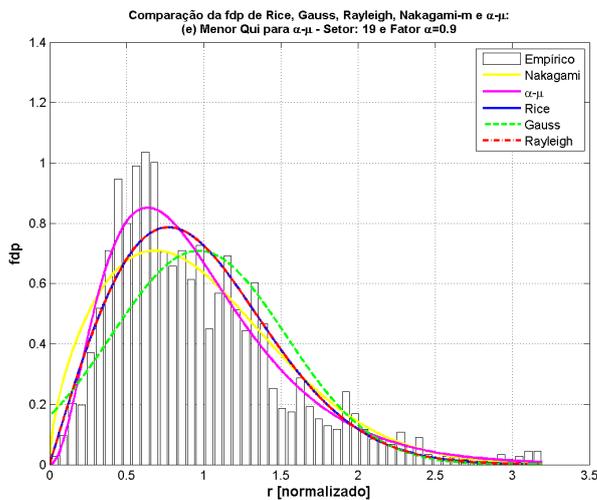
(e) Menor qui-quadrado para fdp $\alpha - \mu$

Figura 5.7: Setor que apresentou o melhor ajuste pelo teste qui-quadrado para cada fdp na rota 7

Tabela 5.7: Resumo dos valores encontrados para a rota 7

Rota: 7 Quantidade total setores na rota: 55					
Quant. de vezes que a fdp passou no teste Qui:	Gauss	Ray	Rice	Nak	$\alpha - \mu$
Total fdp que passou no teste Qui (95%):	55	54	54	55	55
Quantidade de vezes que a fdp passou no teste Qui com menor valor					
	Gauss	Ray	Rice	Nak	$\alpha - \mu$
Total com menor valor Qui:	0	2	4	16	35
Maior e menor valor de K e QUI que passou no teste					
Menor valor de K: 0.00 para QUI: 9.48					
Maior valor de K: 1.00 para QUI: 3.51					
Valor de K: 0.00 para menor QUI: 1.40					
Valor de K: 0.00 para maior QUI: 22.64					
Valor de K da fdp de Rice: mínimo máximo					
0.00 1.00					
Maior e menor valor de m e QUI que passou no teste					
Menor valor de m: 0.50 para QUI: 7.22					
Maior valor de m: 1.10 para QUI: 2.15					
Valor de m: 0.70 para menor QUI: 0.78					
Valor de m: 0.80 para maior QUI: 8.09					
Valor de m da fdp de Nakagami: mínimo máximo					
0.50 1.10					
Maior e menor valor de α e QUI que passou no teste					
Menor valor de α : 0.90 para QUI: 1.17					
Maior valor de α : 6.70 para QUI: 6.76					
Valor de α : 2.70 para menor QUI: 0.69					
Valor de α : 1.60 para maior QUI: 7.96					
Valor de α da fdp de $\alpha - \mu$: mínimo máximo					
0.90 6.70					
Menor e maior valor de Qui para cada fdp:					
Menor QUI:	Gauss	Ray	Rice	Nak	$\alpha - \mu$
	2.15	1.40	1.40	0.78	0.69
Maior QUI:	52.96	22.64	22.64	8.09	7.96
Qualidade de ajuste pelo teste Qui para cada fdp:					
Passou exclusivamente:	Gauss	Ray	Rice	Nak	$\alpha - \mu$
	0	0	0	0	0
Nenhuma fdp passou:	0	0	0	0	0
Todas passaram ao mesmo tempo:	54	54	54	54	54

A título de exemplo, a tabela 5.8 ilustra os valores calculados pelo teste qui-quadrado para cada fdp em cada um dos setores da rota 4, com a informação de ter ou não ter passado no referido teste, além do valor obtido para o parâmetro K da fdp de Rice, parâmetro m da fdp de Nakagami e parâmetro α da fdp $\alpha - \mu$, ficando as demais tabelas para o apêndice A.

Tabela 5.8: Valores do teste qui-quadrado para cada fdp em cada setor da rota 4

Setor	QUI Gauss	QUI Ray	QUI Rice	k	QUI Nak	m	QUI $\alpha - \mu$	α
1	5.63	22.56	5.56	4.0	17.39	1.4	7.20	7.8
2	4.18	4.71	3.17	1.0	3.37	1.2	3.20	2.7
3	4.17	6.56	3.57	2.0	4.87	1.3	3.71	4.0
4	2.27	8.27	3.16	2.0	8.05	1.2	3.83	7.6
5	1.38	4.01	1.10	2.0	2.27	1.4	1.55	3.8
6	1.89	9.52	2.32	3.0	6.88	1.3	3.30	4.6
7	6.35	7.79	6.36	1.0	7.30	1.1	6.63	2.9
8	4.10	10.36	3.82	2.0	7.37	1.3	4.87	4.9
9	2.67	12.97	3.40	3.0	9.73	1.3	4.04	5.1
10	1.50	2.63	1.47	1.0	1.92	1.3	1.33	3.7
11	3.33	1.58	1.58	0.0	1.28	0.9	1.37	2.0
12	1.66	2.35	1.56	1.0	2.29	1.1	1.55	4.6
13	2.06	1.64	1.41	1.0	1.54	1.1	1.46	2.8
14	6.16	7.25	7.25	0.0	6.92	0.9	2.63	8.6
15	3.25	13.11	4.83	2.0	11.42	1.2	5.31	5.3
16	5.13	7.23	4.54	1.0	7.24	1.1	3.51	5.3
17	6.58	15.98	8.33	2.0	15.44	1.2	7.49	6.6
18	12.18	26.11	14.26	2.0	24.66	1.2	15.68	6.2
19	16.55	28.35	21.20	1.0	30.34	1.1	12.89	7.4
20	16.65	35.13	16.16	2.0	30.23	1.3	13.65	13.6
21	7.51	25.50	11.14	3.0	23.02	1.2	11.02	6.2
22	6.13	25.61	6.88	3.0	17.76	1.4	9.91	4.2
23	9.89	21.34	9.47	2.0	17.35	1.3	8.07	7.5
24	6.20	8.18	5.87	1.0	7.87	1.1	5.70	4.4
25	8.11	10.46	7.33	2.0	10.26	1.2	5.64	17.3
26	3.38	5.47	2.97	2.0	4.37	1.3	3.65	3.9
27	2.95	6.13	3.80	2.0	6.24	1.1	2.47	6.6
28	11.34	16.51	16.51	0.0	9.57	0.7	6.39	30.0
29	3.20	3.24	3.24	0.0	2.99	0.9	1.21	8.2
30	2.70	7.18	2.69	2.0	4.96	1.4	2.60	5.8
31	4.03	7.24	7.24	0.0	4.11	0.7	2.24	5.3
32	2.83	5.28	3.46	1.0	4.86	1.1	3.56	3.5
33	7.77	20.91	9.55	2.0	18.10	1.2	11.08	3.9
34	5.68	6.79	6.10	1.0	6.90	1.0	5.87	3.2
35	7.76	26.23	9.87	3.0	22.54	1.2	11.34	6.2
36	8.11	27.66	10.69	2.0	23.40	1.2	11.14	5.0
37	13.65	31.34	19.85	2.0	32.01	1.1	15.76	6.0
38	23.46	15.97	15.97	0.0	15.85	1.1	16.62	2.3
39	26.73	18.37	18.37	0.0	18.80	1.0	18.90	2.2
40	8.17	15.35	10.20	1.0	14.41	1.1	9.16	4.0
41	34.61	18.63	13.64	2.0	14.48	1.3	14.47	2.7
42	7.44	21.13	8.45	2.0	16.78	1.3	6.27	5.2
43	9.55	14.22	9.27	2.0	11.46	1.2	10.13	3.7
44	9.12	10.84	7.90	1.0	10.13	1.2	8.57	4.5
45	10.14	15.16	7.04	2.0	9.77	1.3	8.52	2.9
46	3.95	15.26	3.89	2.0	10.16	1.3	4.49	4.5
47	9.77	40.72	11.98	3.0	30.16	1.4	14.07	4.6
48	18.64	40.08	28.94	2.0	43.31	1.0	13.97	9.2
49	15.36	35.59	20.28	2.0	36.14	1.1	15.54	8.3
50	12.13	49.18	14.61	3.0	39.46	1.3	13.90	7.4
51	6.59	27.16	6.68	3.0	16.94	1.4	10.22	3.7
52	7.14	9.16	6.90	1.0	9.25	1.1	6.72	4.4

Obs.: NaN indica que a fdp não passou no teste qui-quadrado.

Observando a tabela 5.1 que contém o resumo dos resultados de cada fdp para a rota 1, verifica-se que, a distribuição que se ajustou melhor, com o maior número de vezes que passou no teste qui-quadrado com o menor valor, dezenove vezes ao total, foi a distribuição $\alpha - \mu$, seguida, pelas distribuições de Gauss e Rice, ambas passando 11 vezes, enquanto as distribuições de Rayleigh e Nakagam, passaram 2 e 3 vezes, respectivamente. Já na tabela 5.4, que apresenta o resumo dos resultados da rota 4, a que melhor se ajustou foi a distribuição de Gauss, passando 20 vezes com o menor qui-quadrado, seguida pela fdp $\alpha - \mu$ e de Rice, passando 17 e 13 vezes, respectivamente. Assim como ocorrido na rota 1, as distribuições de Rayleigh e Nakagami tiveram resultados modestos, passando 2 vezes a fdp de Nakagami e nenhuma vez a fdp de Rayleigh.

Embora a rota 4 tenha apresentado o melhor ajuste através da distribuição de Gauss, o bom desempenho da distribuição $\alpha - \mu$ nesta rota e o seu melhor ajuste na rota 1, podem ser atribuída ao fato desta distribuição possuir como caso particular a distribuição gaussiana, pois, tanto na rota 1, quanto na rota 4, ambas com LOS, identificam-se valores do parâmetro K de Rice que tendem para a distribuição gaussiana, indicando assim, um raio dominante e, esta por sua vez é um caso particular da distribuição $\alpha - \mu$.

Nas tabelas 5.2, 5.5, 5.6 e 5.7, contendo o resumo dos resultados das rotas 2, 5, 6 e 7, respectivamente, evidencia-se o melhor ajuste pela distribuição $\alpha - \mu$, apresentando ajuste em mais de 63% dos setores, tendo as demais distribuições apresentando valores modestos. A distribuição $\alpha - \mu$, com seu resumo exposto na tabela 5.3, também foi a que melhor se ajustou nesta rota, que possui sua parte inicial com LOS.

De uma forma geral, uma das possíveis explicações para a distribuição $\alpha - \mu$ apresentar um bom ajuste nas maioria dos setores das rotas do ambiente estudado, incluindo rotas com LOS e NLOS, pode ser entendida pelo fato desta distribuição apresentar um modelo físico mais genérico, além de possuir uma flexibilidade maior, quando comparada às demais distribuições, apresentando assim, um melhor ajuste aos dados. As demais distribuições possuem, do início ao fim de suas caudas, um comportamento praticamente reto, sem flexibilidade. Através dos gráficos exibidos nas figuras 5.2 (e), 5.3 (e) e 5.5 (e) esse tipo de comportamento pode ser identificado.

5.3 Cálculo da Taxa de Cruzamento de Nível e Duração Média de Desvanecimento

A taxa de cruzamento de nível (N_R) e a duração média de desvanecimento (T_R) foram determinadas para os dados medidos. Em seguida, compararam-se os valores medidos com as respectivas N_R e T_R teóricas conhecidas para a fdp de Rayleigh, Rice, e Nakagami-m, conforme já descrito no capítulo 3.

Deste modo, foi possível verificar, graficamente, em cada setor, a aderência da N_R e T_R da distribuição que mais se ajustou, comparando os resultados obtidos para as curvas estatísticas com os encontrados para a variação da taxa de cruzamento de nível e a duração média de desvanecimento. É importante destacar que os setores escolhidos exibem os gráficos que representam o comportamento destes parâmetros que é mais frequente em cada rota, ou seja, apresentam uma noção geral da variação destes parâmetros de acordo com os níveis de desvanecimento de pequena escala do sinal recebido na maioria dos setores de cada rota, sendo assim, representativos.

Vale observar que os parâmetros determinados para a distribuição $\alpha - \mu$ não apresentaram aderência aos parâmetros experimentais e, portanto, seus resultados foram descartados. Em bibliografia conseguida recentemente [55, 45] é definida uma igualdade útil para ajudar na estimação dos parâmetros α e μ , que o autor mostra ser essencial para um bom ajuste dos mesmos. Isto será objeto de trabalho posterior.

Os resultados de dois setores de cada uma das rotas para as distribuições de Rayleigh, Rice e Nakagami-m são apresentados nas figuras 5.8 a 5.14, onde se tem as seguintes informações: (a) Comparação das estatísticas de desvanecimento rápido do sinal considerando cada fdp; (b) Taxa de Cruzamento de Nível Normalizada; e (c) Duração Média de Desvanecimento Normalizada.

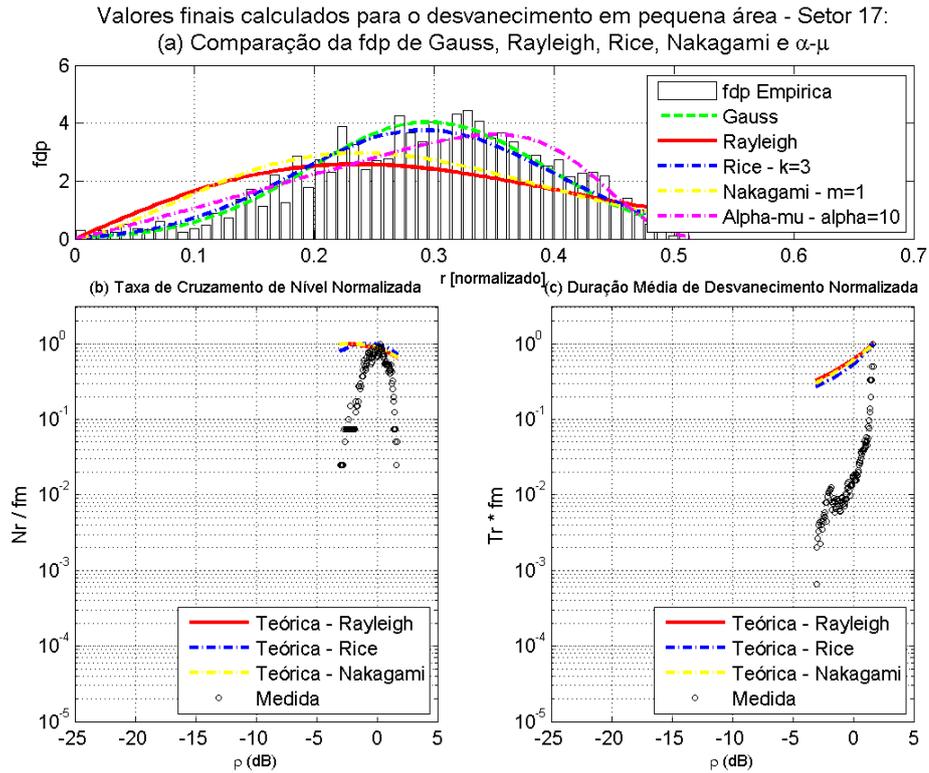
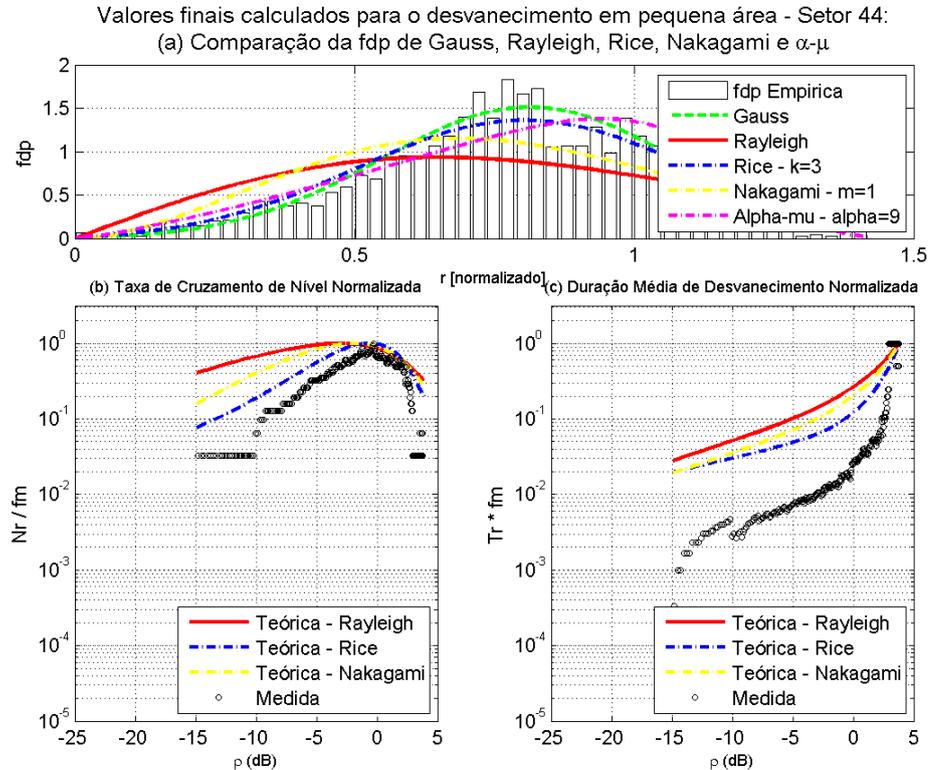
(a) N_R e T_R para o setor 17 da rota 1(b) N_R e T_R para o setor 44

Figura 5.8: Resultado da taxa de cruzamento de nível e duração média de desvanecimento para um setor da rota 1

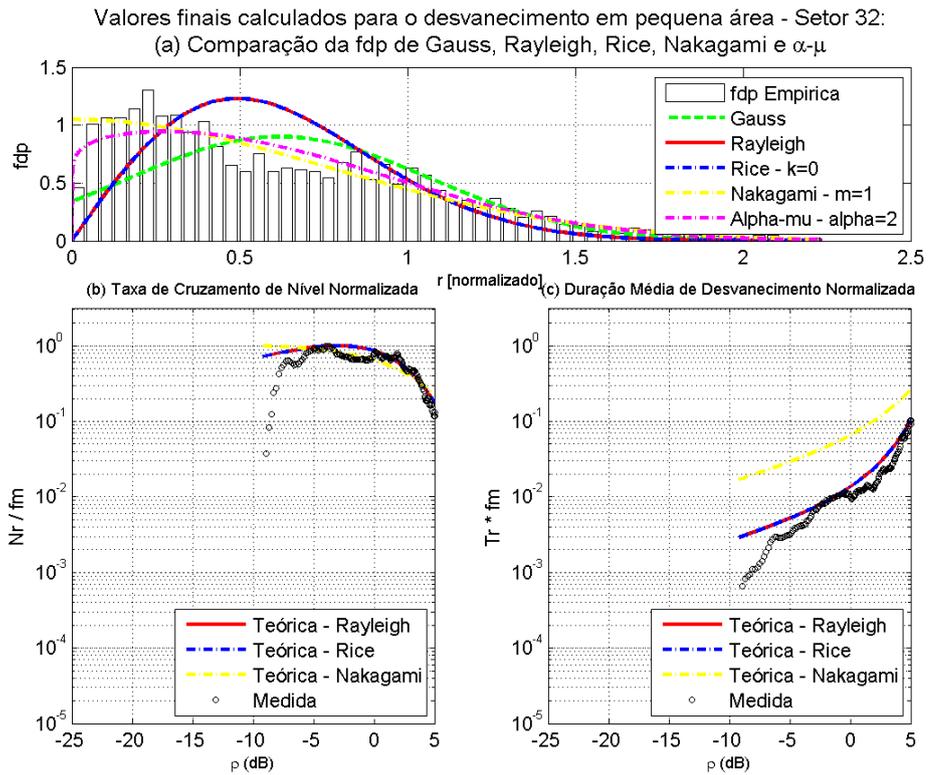
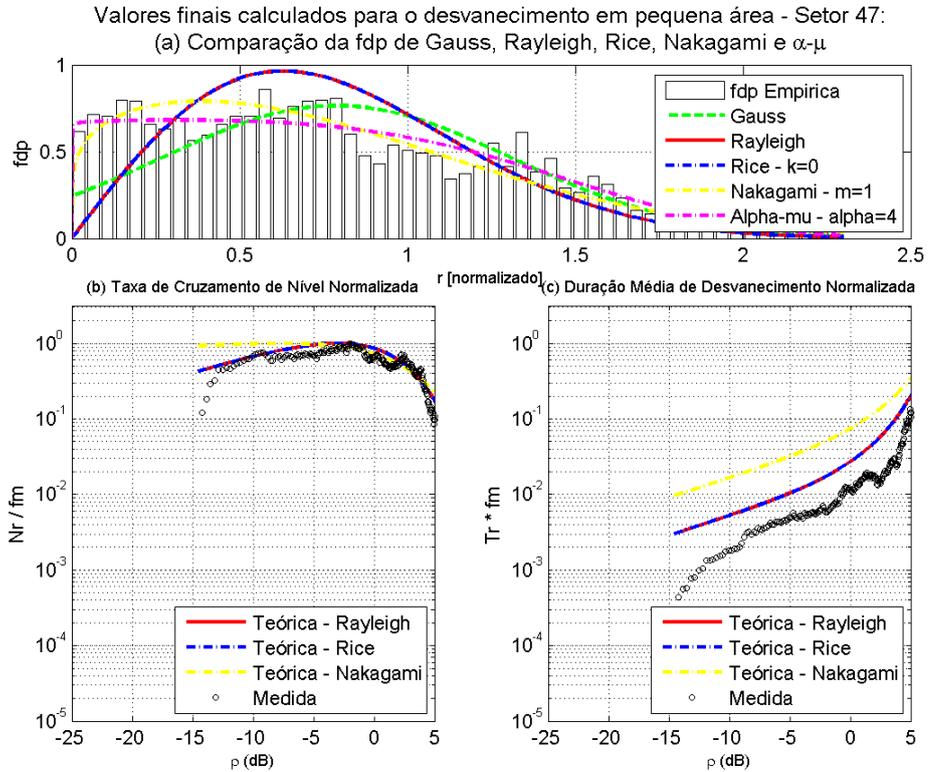
(a) N_R e T_R para o setor 32 da rota 2(b) N_R e T_R para o setor 47

Figura 5.9: Resultado da taxa de cruzamento de nível e duração média de desvanecimento para um setor da rota 2

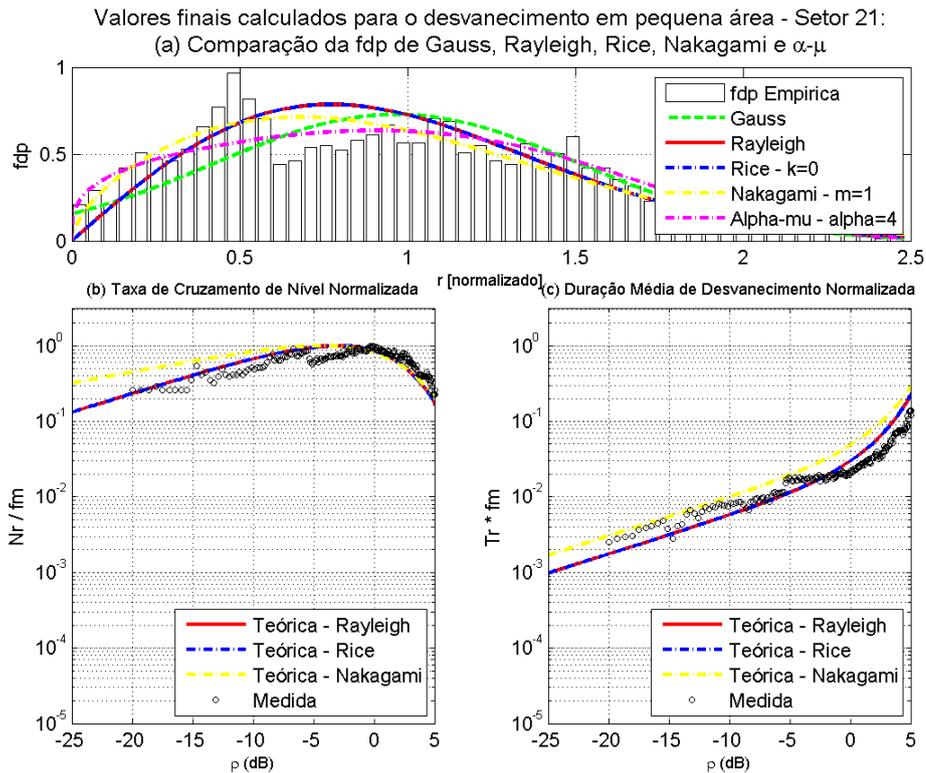
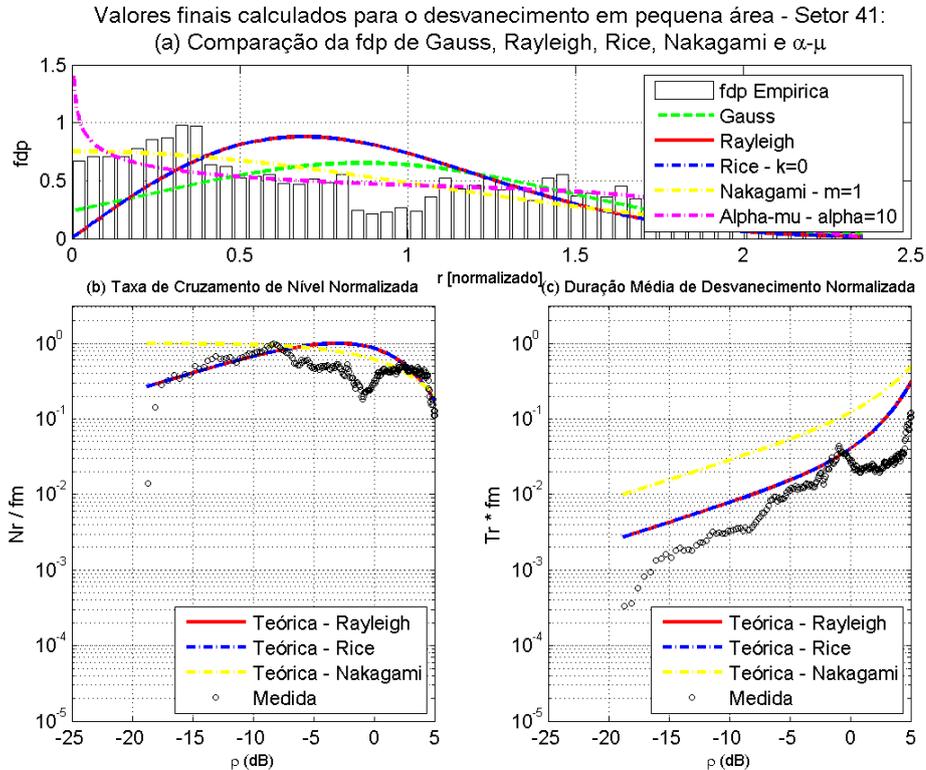
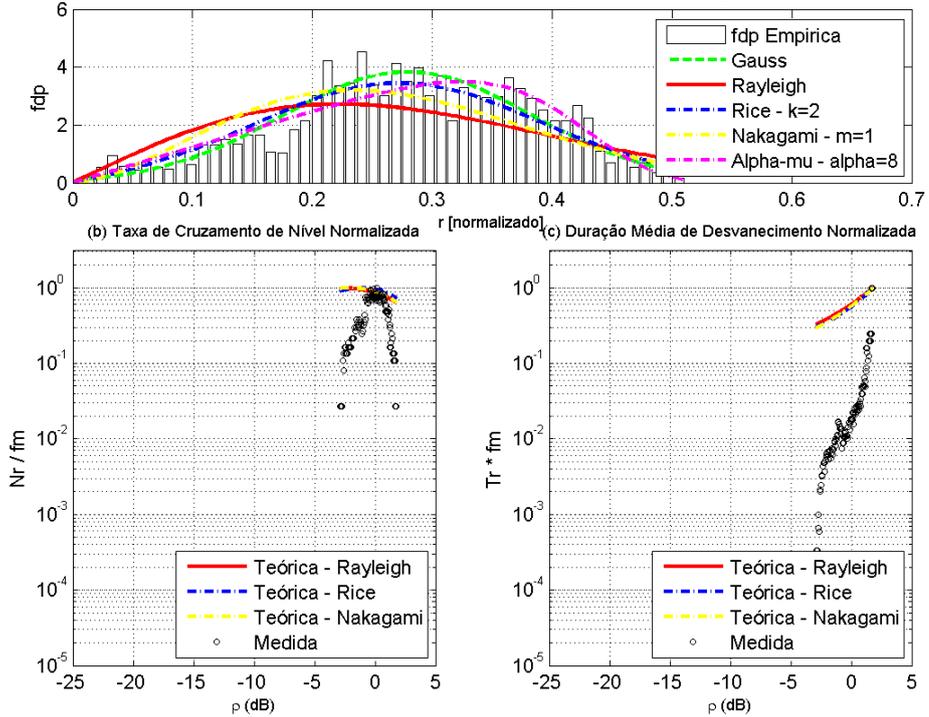
(a) N_R e T_R para o setor 21 da rota 3(b) N_R e T_R para o setor 41 da rota 3

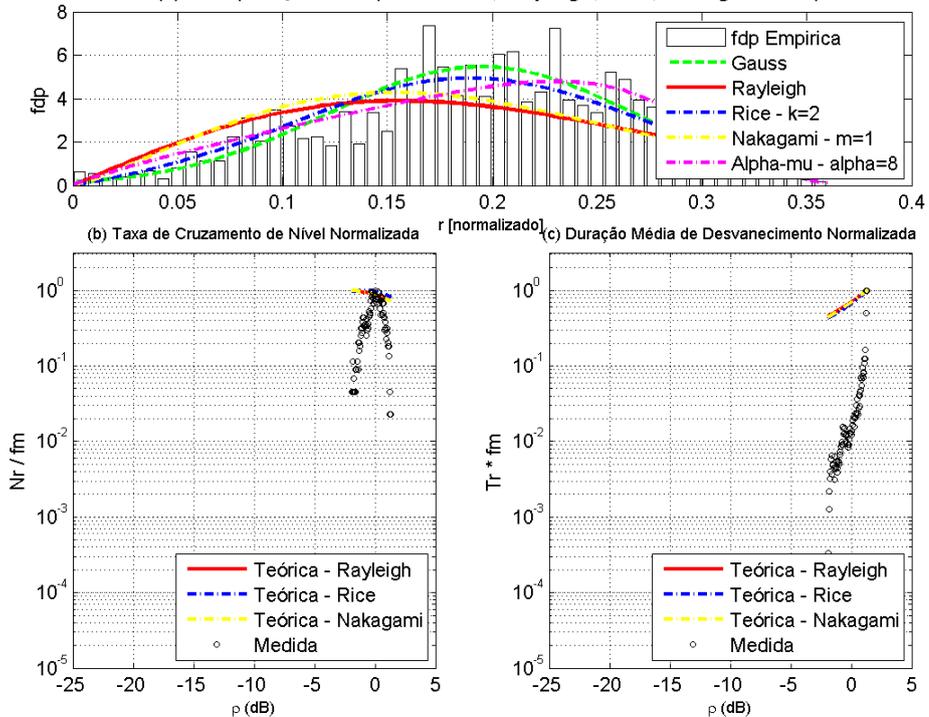
Figura 5.10: Resultado da taxa de cruzamento de nível e duração média de desvanecimento para um setor da rota 3

Valores finais calculados para o desvanecimento em pequena área - Setor 23:
 (a) Comparação da fdp de Gauss, Rayleigh, Rice, Nakagami e α - μ



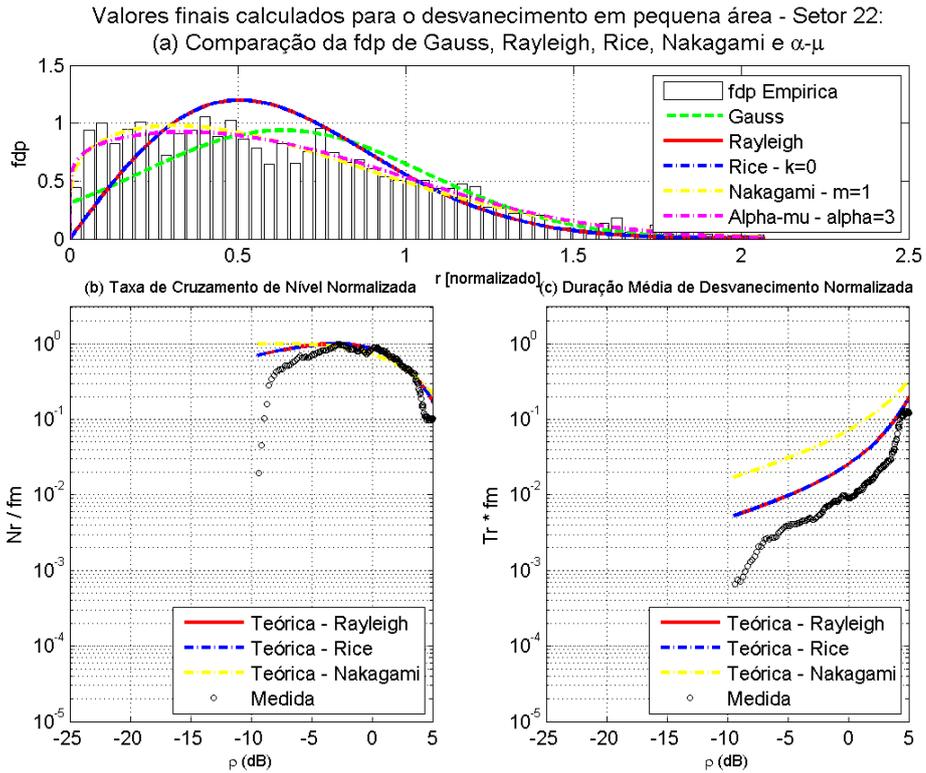
(a) N_R e T_R para o setor 23 da rota 4

Valores finais calculados para o desvanecimento em pequena área - Setor 49:
 (a) Comparação da fdp de Gauss, Rayleigh, Rice, Nakagami e α - μ

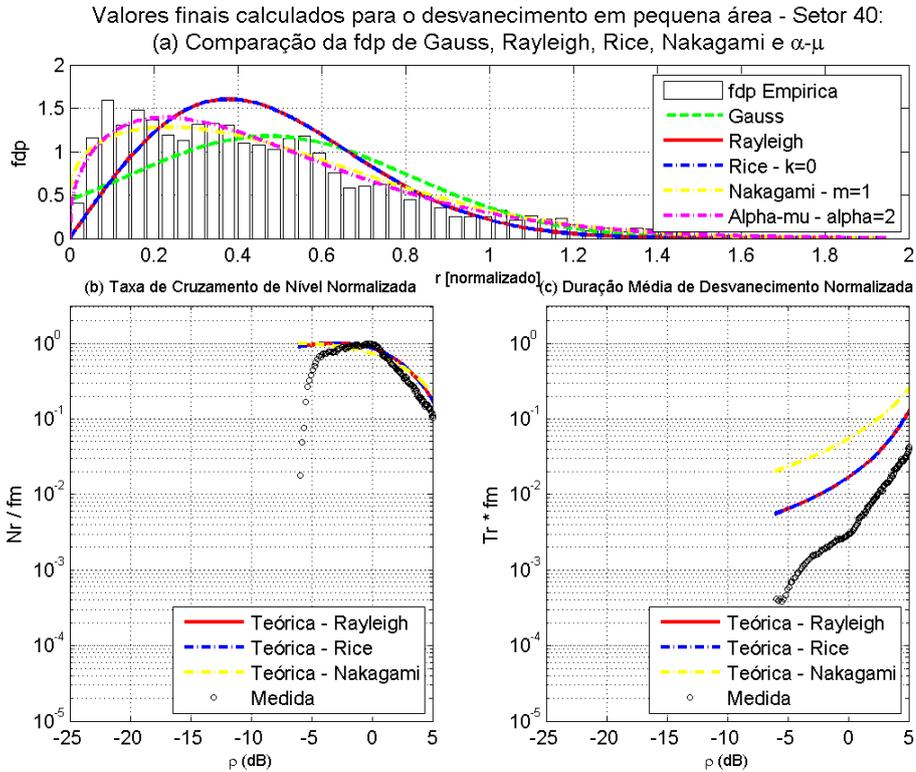


(b) N_R e T_R para o setor 49 da rota 4

Figura 5.11: Resultado da taxa de cruzamento de nível e duração média de desvanecimento para um setor da rota 4



(a) N_R e T_R para o setor 22 da rota 5



(b) N_R e T_R para o setor 40 da rota 5

Figura 5.12: Resultado da taxa de cruzamento de nível e duração média de desvanecimento para um setor da rota 5

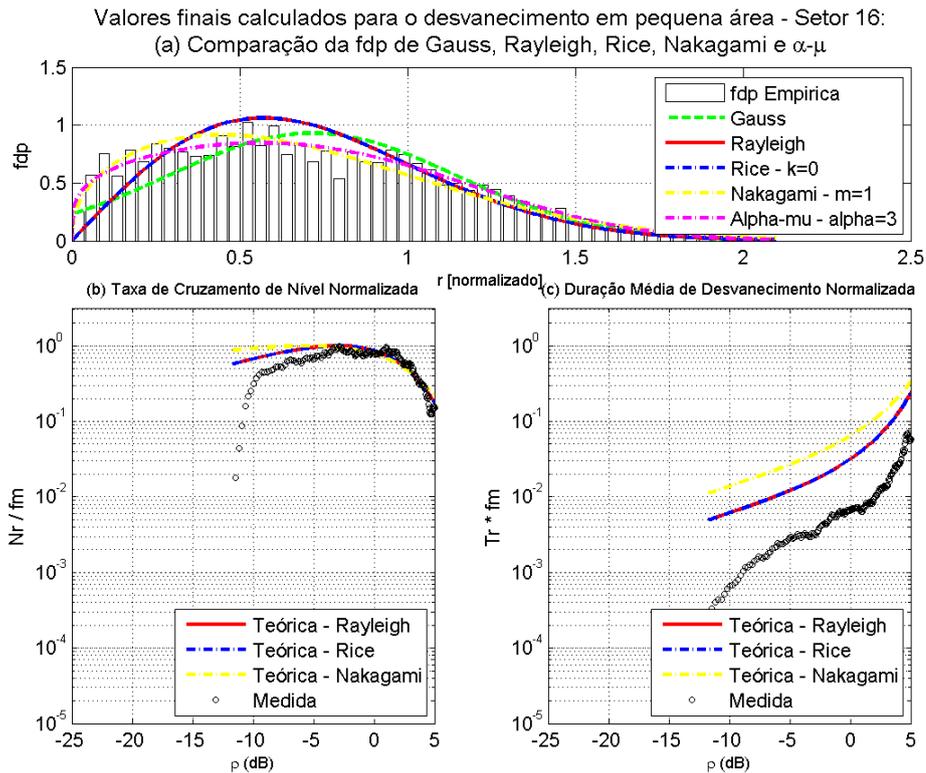
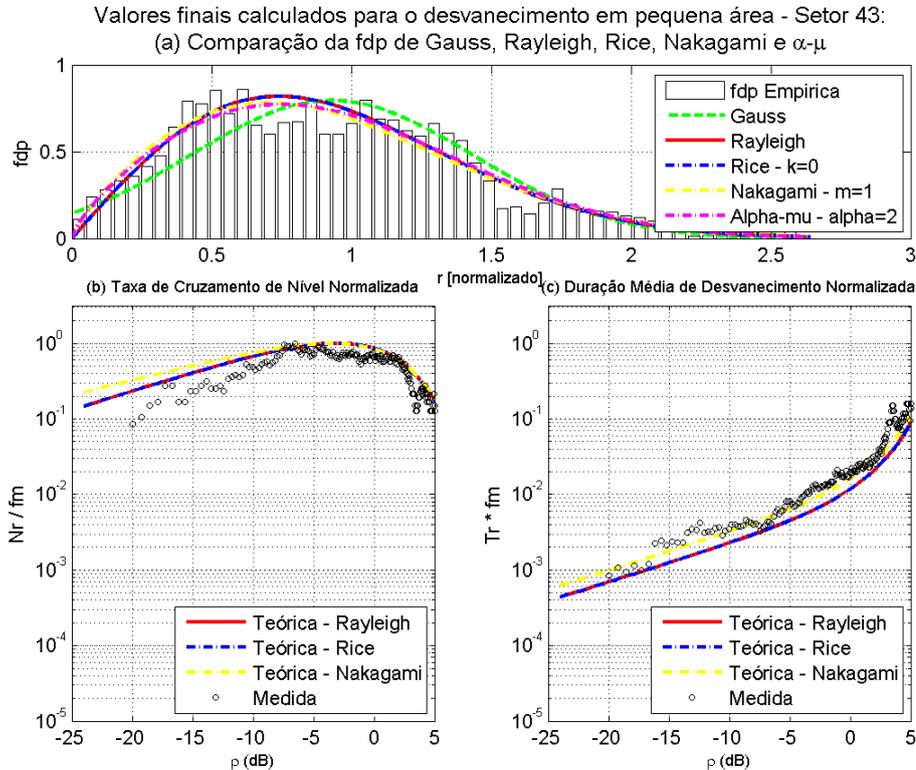
(a) N_R e T_R para o setor 16 da rota 6(b) N_R e T_R para o setor 43 da rota 6

Figura 5.13: Resultado da taxa de cruzamento de nível e duração média de desvanecimento para um setor da rota 6

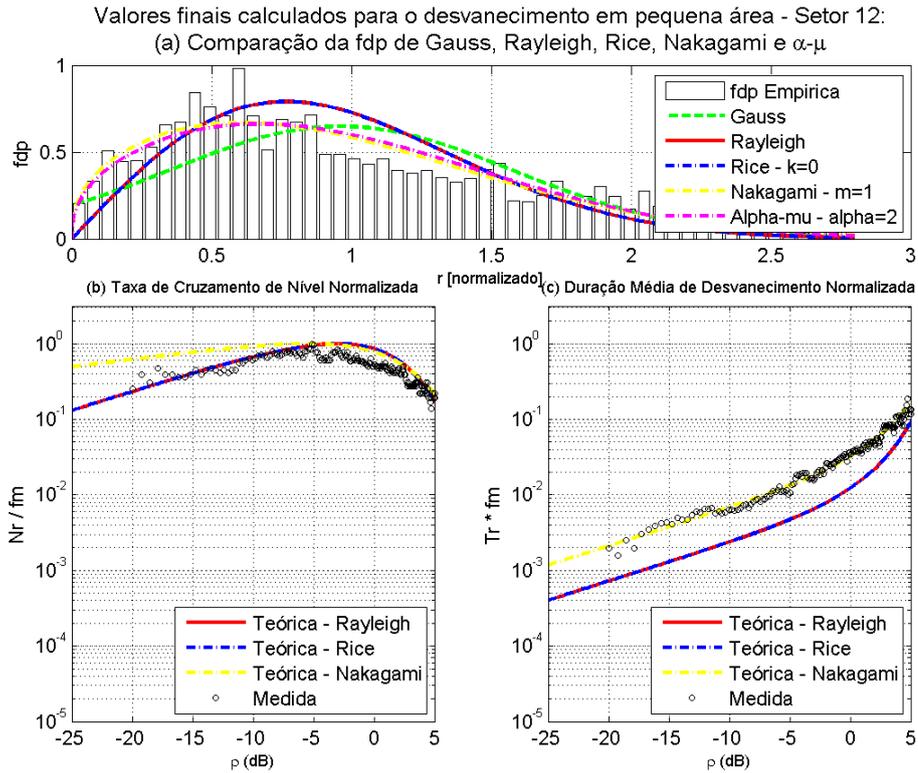
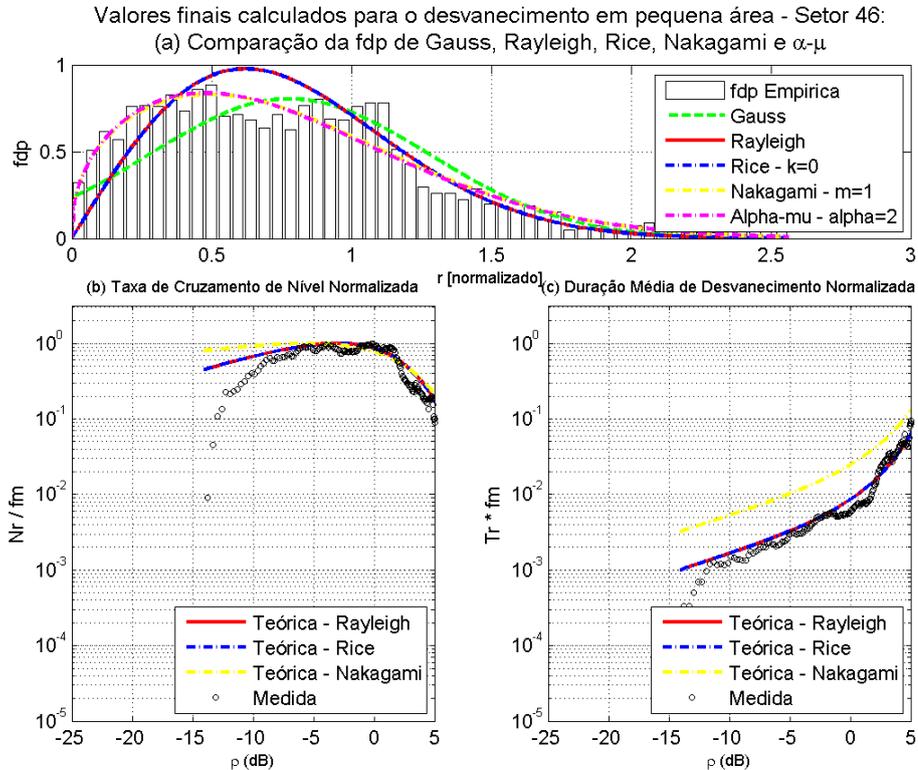
(a) N_R e T_R para o setor 12 da rota 7(b) N_R e T_R para o setor 46 da rota 7

Figura 5.14: Resultado da taxa de cruzamento de nível e duração média de desvanecimento para um setor da rota 7

Observa-se que embora a rota 1 possua LOS, apenas 15 dos 44 setores desta rota apresentaram uma componente dominante do sinal, conforme ilustrado na figura 5.8 (a), tendo os demais setores um comportamento como exibido na figura 5.8 (b), onde se visualiza que, embora distante, a taxa de cruzamento de nível e duração média de desvanecimentos da fdp de Rice foram a que mais se aproximou. Este fato não ocorreu na rota 4, que também possui LOS, onde os desvanecimentos não são profundos e o sinal está mais concentrado em torno do seu valor eficaz, conforme apresentando nas figuras 5.11 (a) e (b). A rota 3, com apenas a sua parte inicial com LOS, apresentou desvanecimentos mais profundos, superiores a 15 dB, conforme se visualiza na figura 5.13, com a taxa de cruzamento de nível e duração média de desvanecimento da distribuição de Rayleigh apresentando um ajuste próximo. Já nas rotas NLOS 2, 5, 6 e 7, ocorrem desvanecimentos mais profundos e os sinais estão mais espalhados em torno do seu valor eficaz.

Mais um ponto a destacar, é que, mesmo nas rotas NLOS 2, 5, 6 e 7, a taxa de cruzamento de nível da distribuição de Rayleigh foi a que apresentou o melhor ajuste, com valores próximos aos valores medidos, conforme se identifica nas figuras 5.9, 5.12, 5.13 e 5.14.

5.4 Análise da Variabilidade de Larga Escala do Sinal

A análise da variação de larga escala do sinal é realizada após a separação do efeito do desvanecimento de larga escala da dependência com a distância. Neste caso, segundo Bertoni [6] a metodologia usada para realizar esta separação, consiste em plotar a potência média (P_{dB}) em uma pequena área ou setor, em escala decibel, versus a distância radial R , em uma escala logarítmica. Então, uma linha reta pode ser ajustada aos dados plotados desta potência média, utilizando o método dos mínimos quadrados. A equação da reta representa a dependência com a distância, sendo dada em escala logarítmica da seguinte forma:

$$P_{dB}(R) = 10\log P_T + 10\log A - n\log R \quad (5.4)$$

ou em watts $P = P_T/R^n$, onde P_T é a potência de transmissão, n é o índice de inclinação e A é a interseção em $R = 1$.

A equação da reta dada pela (5.4) representa a dependência média do sinal com a distância, enquanto que o sombreamento ou desvanecimento de larga escala corresponde à diferença entre a média da pequena área ou setor e a dependência média do sinal com a distância.

No cálculo da média da pequena área ou setor, adotou-se tamanho de setores de 30 comprimentos de onda, garantindo assim, estacionariedade no sentido amplo do sinal, ou seja, média e desvio padrão constantes.

Nas figuras 5.15 a 5.21 são exibidas as retas que representam a dependência do sinal com a distância, através da curva de melhor ajuste e do fator de atenuação (n), este último calculado com base no procedimento apresentado pelas referências [53, 54].

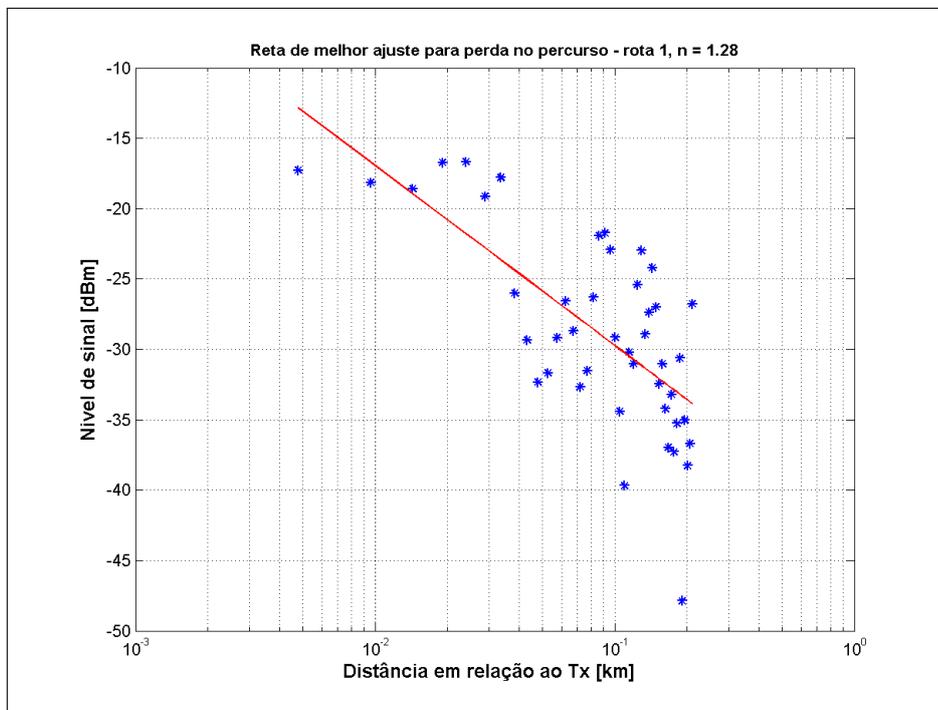


Figura 5.15: Reta de melhor ajuste e fator de atenuação para a rota 1

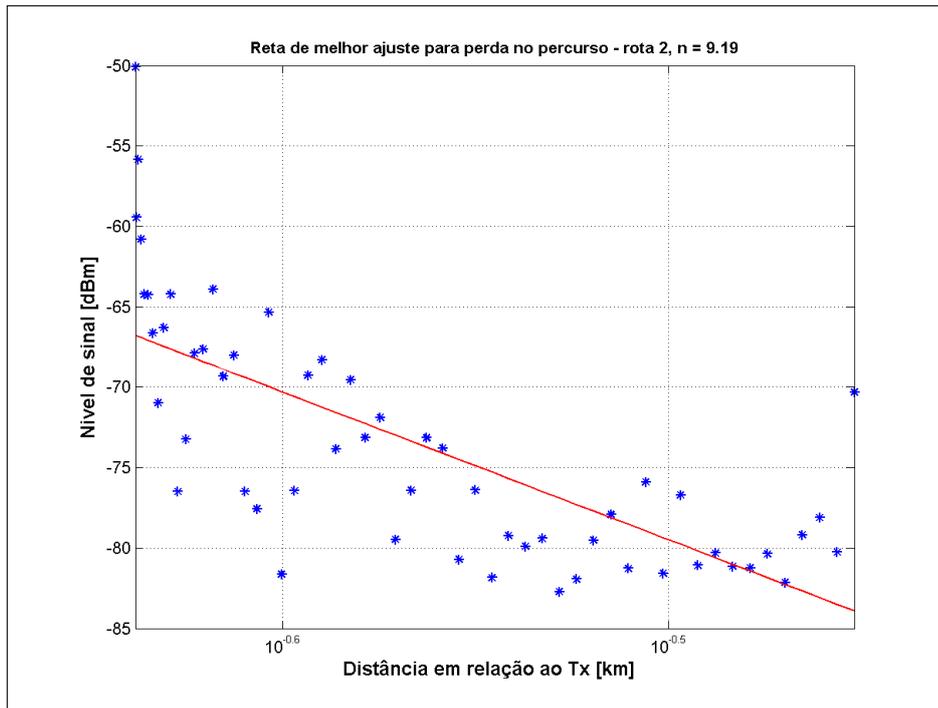


Figura 5.16: Reta de melhor ajuste e fator de atenuação para a rota 2

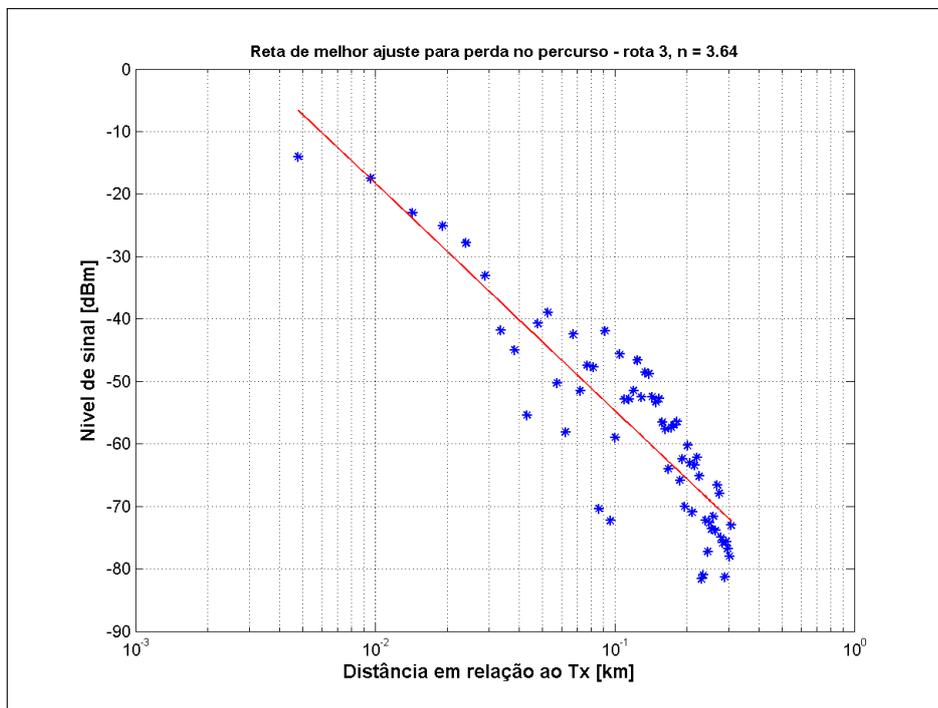


Figura 5.17: Reta de melhor ajuste e fator de atenuação para a rota 3

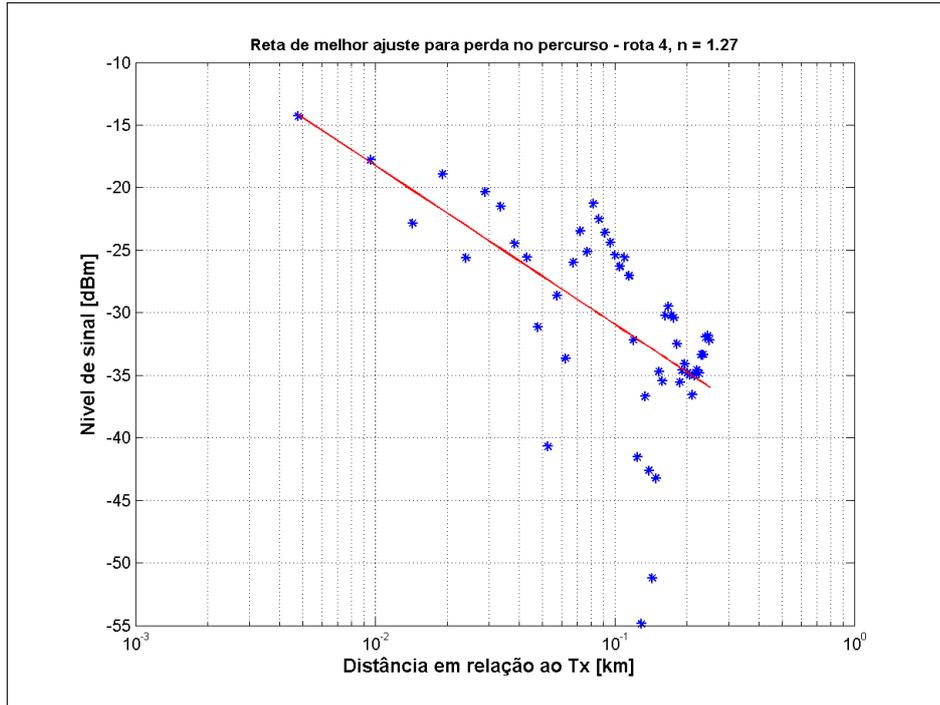


Figura 5.18: Reta de melhor ajuste e fator de atenuação para a rota 4

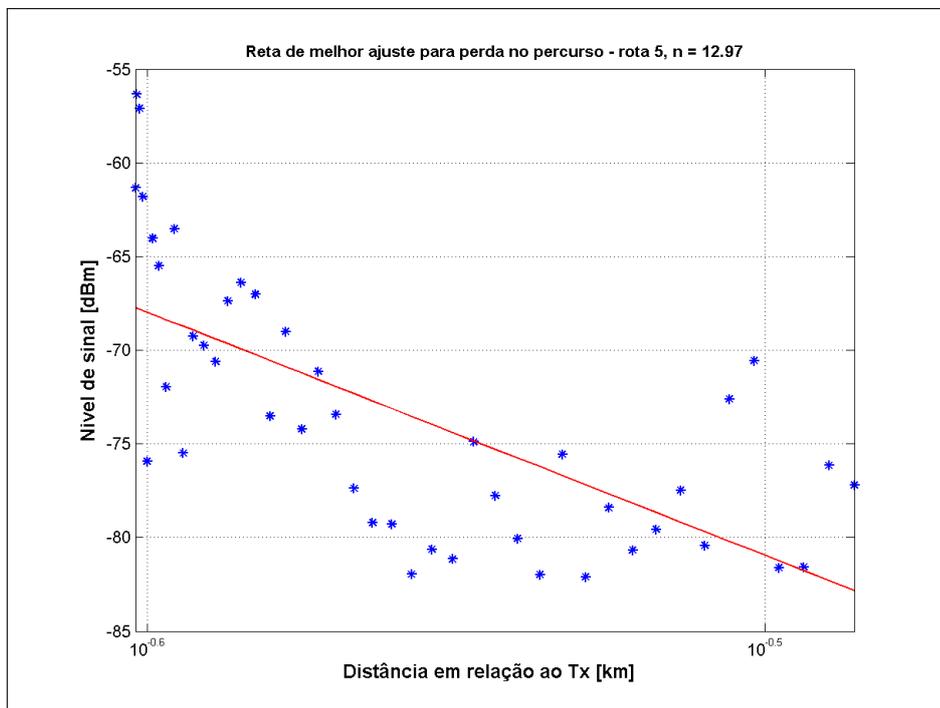


Figura 5.19: Reta de melhor ajuste e fator de atenuação para a rota 5

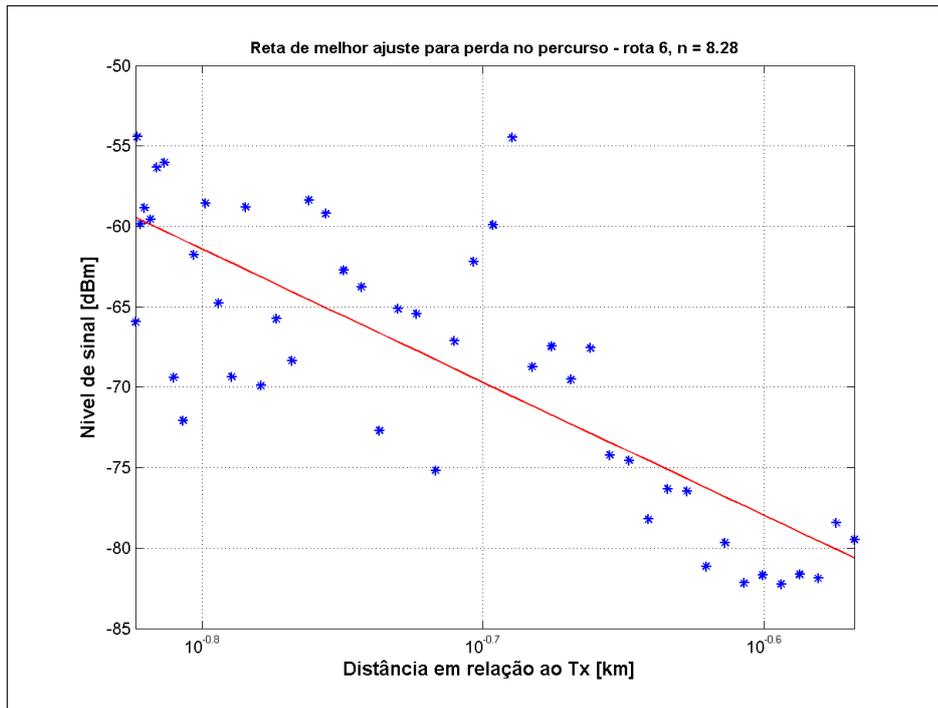


Figura 5.20: Reta de melhor ajuste e fator de atenuação para a rota 6

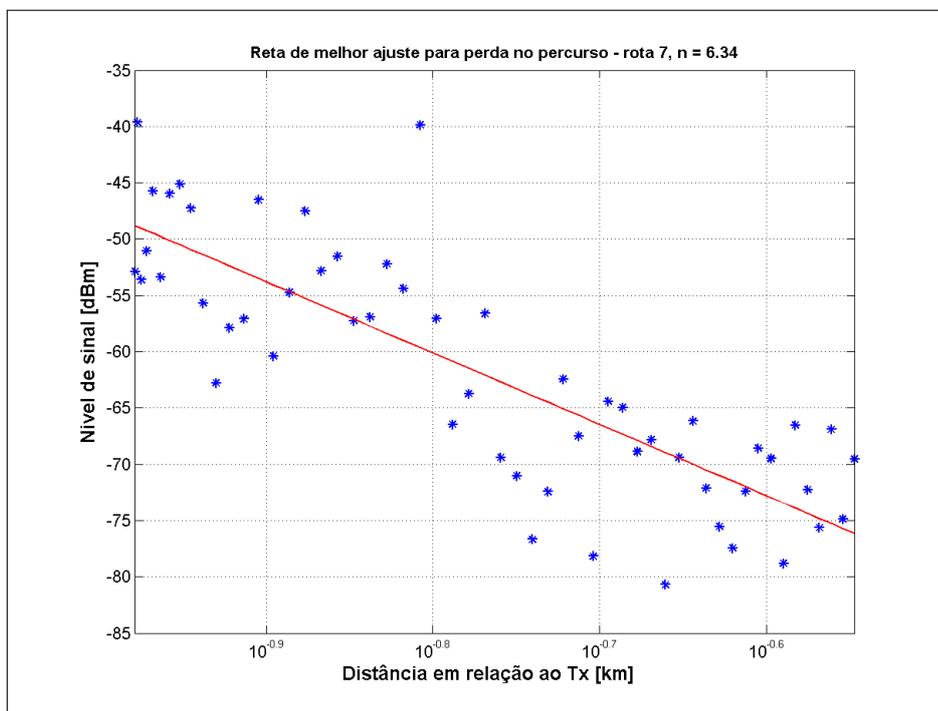
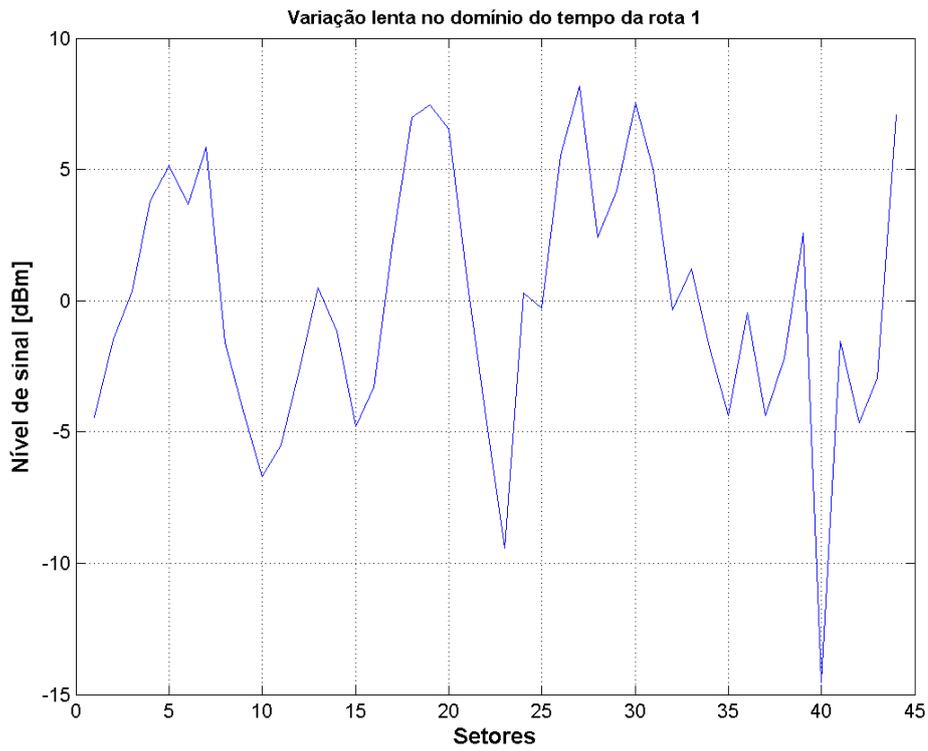


Figura 5.21: Reta de melhor ajuste e fator de atenuação para a rota 7

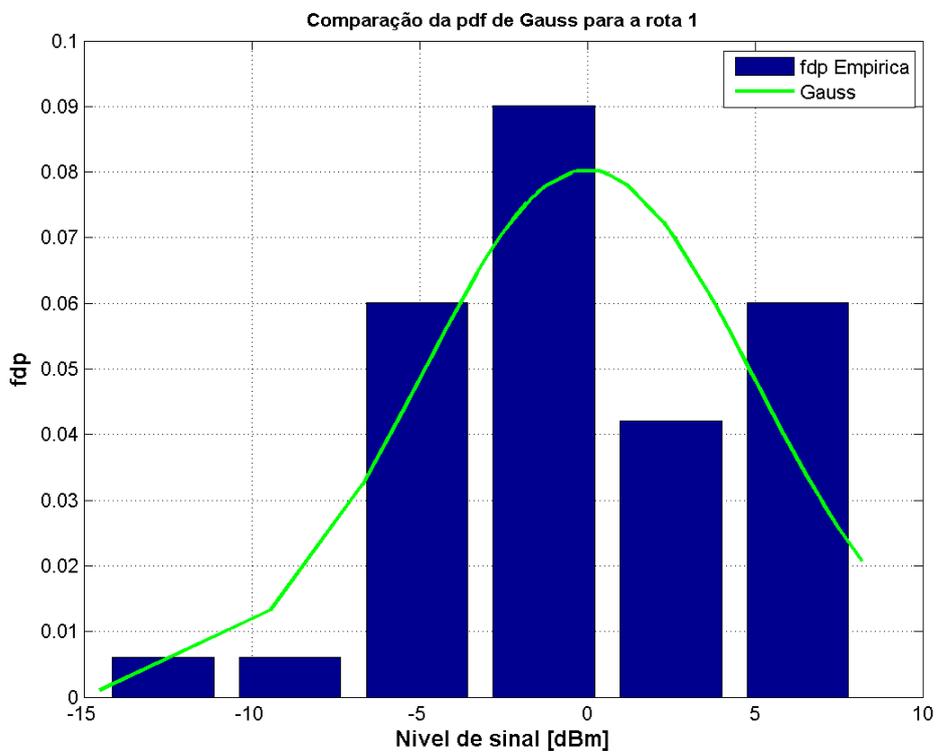
Observa-se que para as rotas 1 e 4, constituídas por um corredor de palmeiras e que apresentam visada entre a antena transmissora e a receptora, o fator de atenuação foi de 1,28 e 1,27, respectivamente. Pode-se entender que o corredor formado pelas palmeiras

nas rotas 1 e 4, concentram a energia dentro da rota, similar a um ambiente *indoor*, fazendo com que o fator de atenuação fique abaixo do fator de atenuação do espaço livre. Já para as rotas 2, 5, 6 e 7, que não possuem visada direta entre o transmissor e o receptor, identificam-se fatores de atenuação elevados. Vale lembrar que os fatores de atenuação do sinal para as rotas 2, 5, 6 e 7 foram obtidos com o deslocamento do receptor ao longo da rota e não adentrando pela vegetação, o que conduziu a valores elevados, já que a variação de potência era elevada para pequena variação de deslocamento. Na rota 3, que apresentava uma parte em visibilidade, o fator de atenuação ficou equivalente a um ambiente de área urbana com sombreamento.

Após determinada a reta de melhor ajuste para cada rota, calculou-se a diferença entre a média da pequena área ou setor e a dependência média do sinal com a distância. Por último, a estatística do desvanecimento de larga escala foi determinada para o sinal medido, sendo calculada a fdp equivalente. A variação de larga escala do sinal, assim como o resultado do ajuste para cada rota são apresentados nas figuras 5.22 a 5.28.

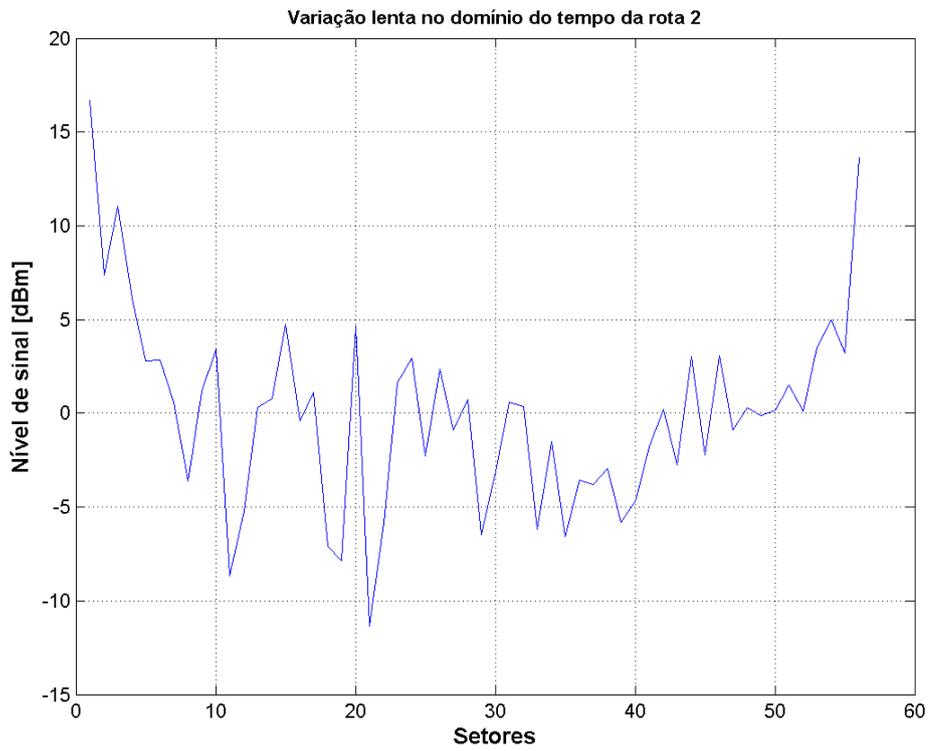


(a) Variação de larga escala do sinal na rota 1

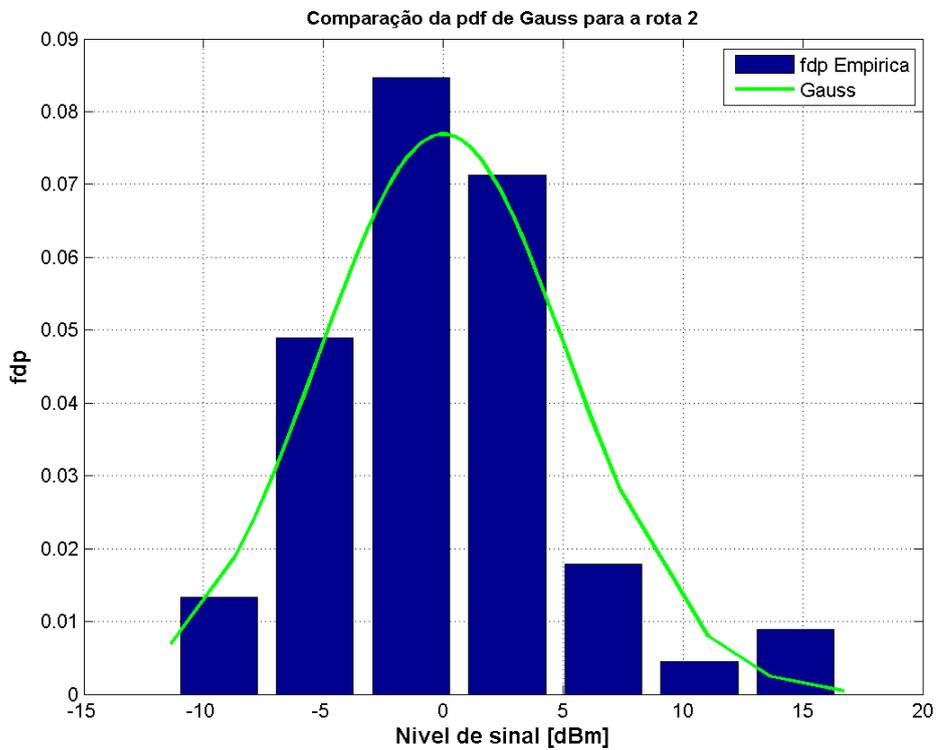


(b) Histograma dos dados empíricos e fdp de Gauss

Figura 5.22: Ajuste do desvanecimento de larga escala na rota 1

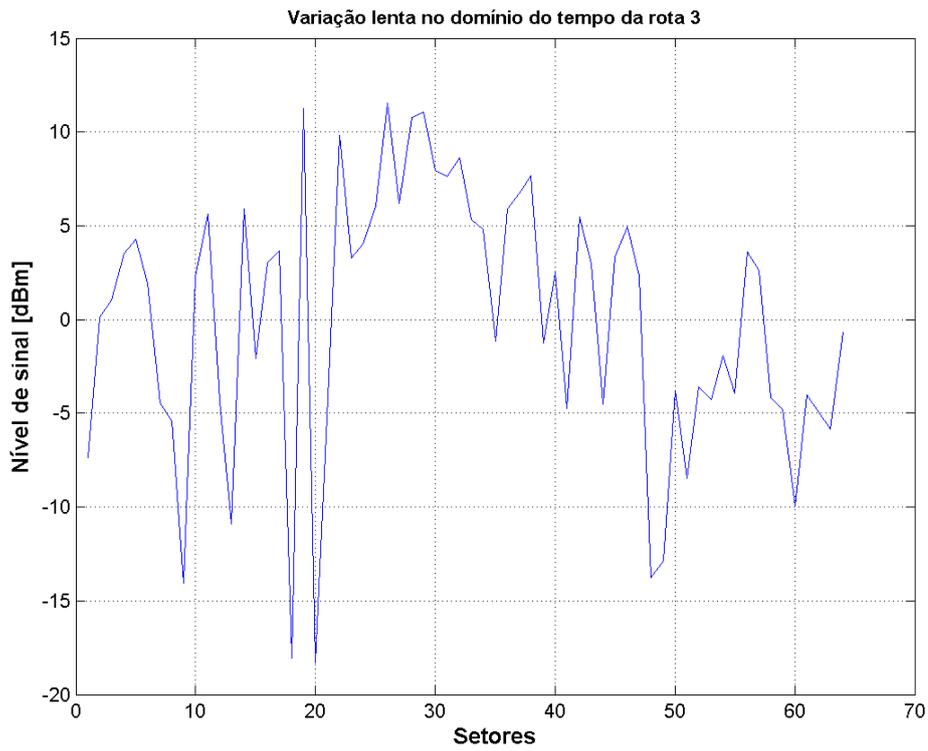


(a) Variação de larga escala do sinal na rota 2

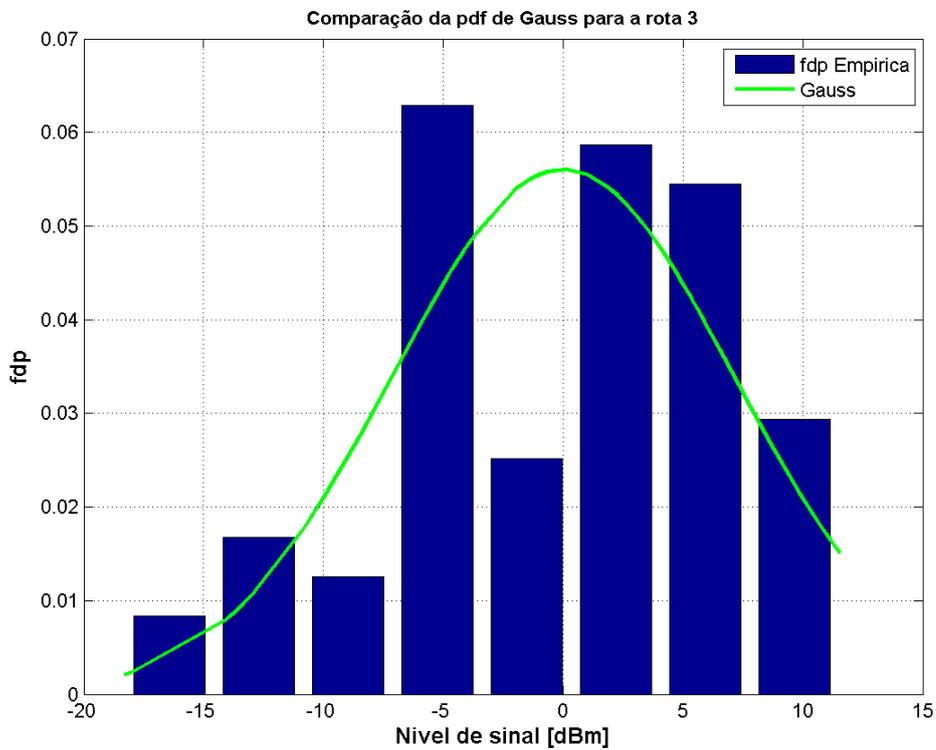


(b) Histograma dos dados empíricos e fdp de Gauss

Figura 5.23: Ajuste do desvanecimento de larga escala na rota 2

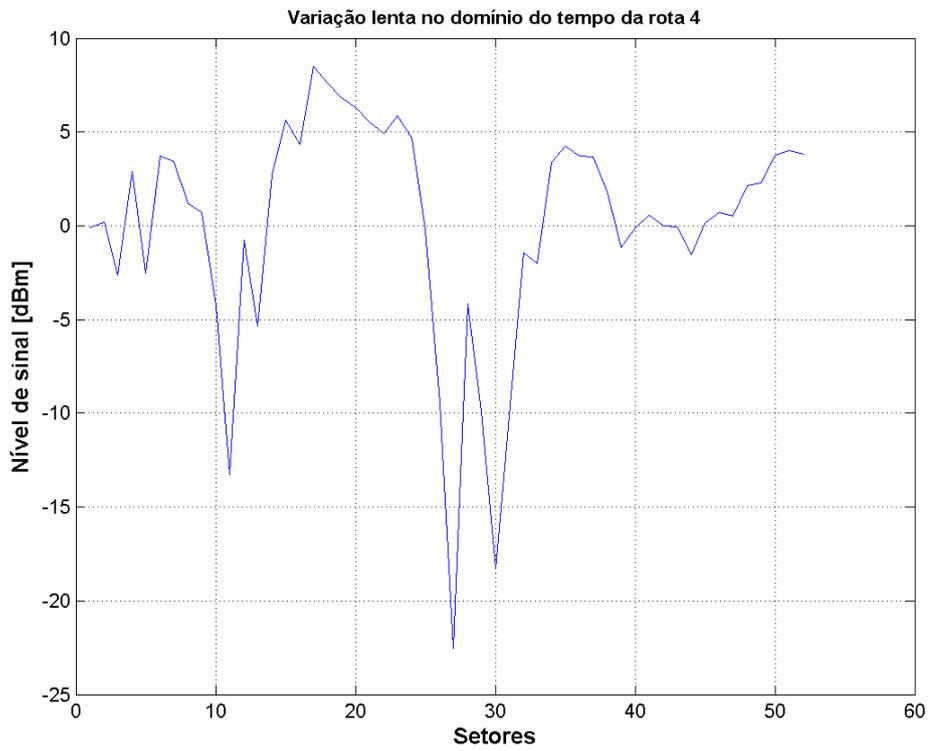


(a) Variação de larga escala do sinal na rota 3

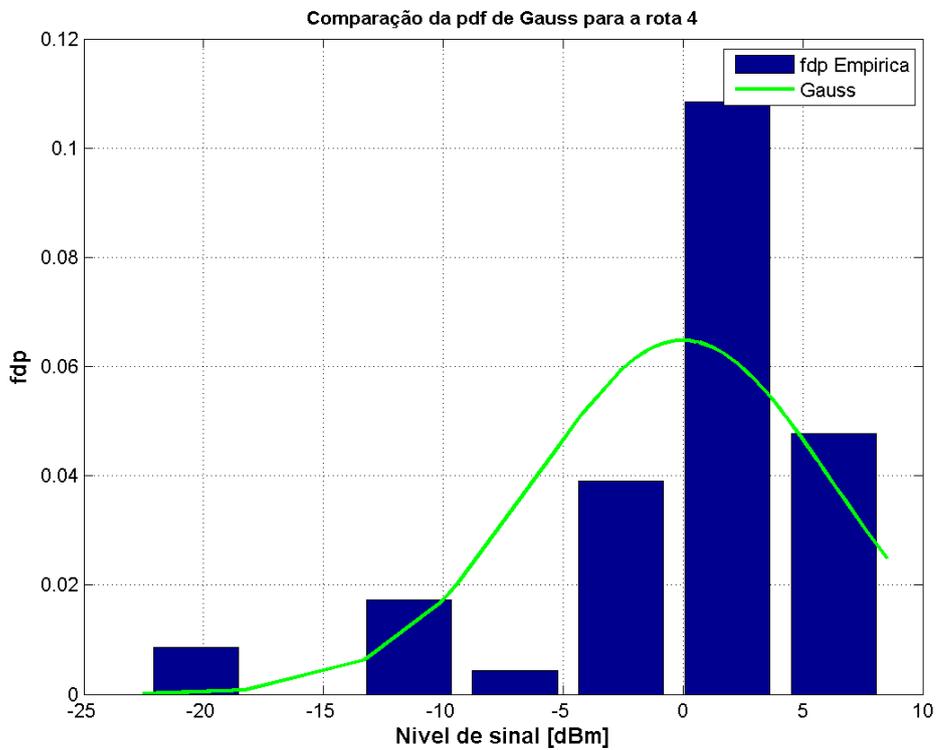


(b) Histograma dos dados empíricos e fdp de Gauss

Figura 5.24: Ajuste do desvanecimento de larga escala na rota 3

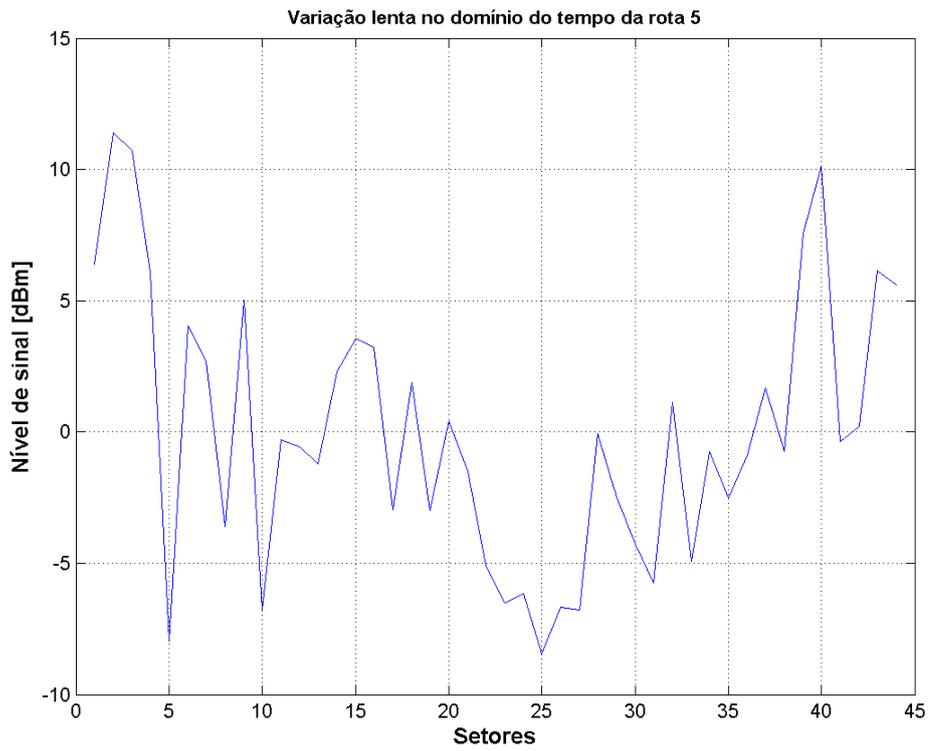


(a) Variação de larga escala do sinal na rota 4

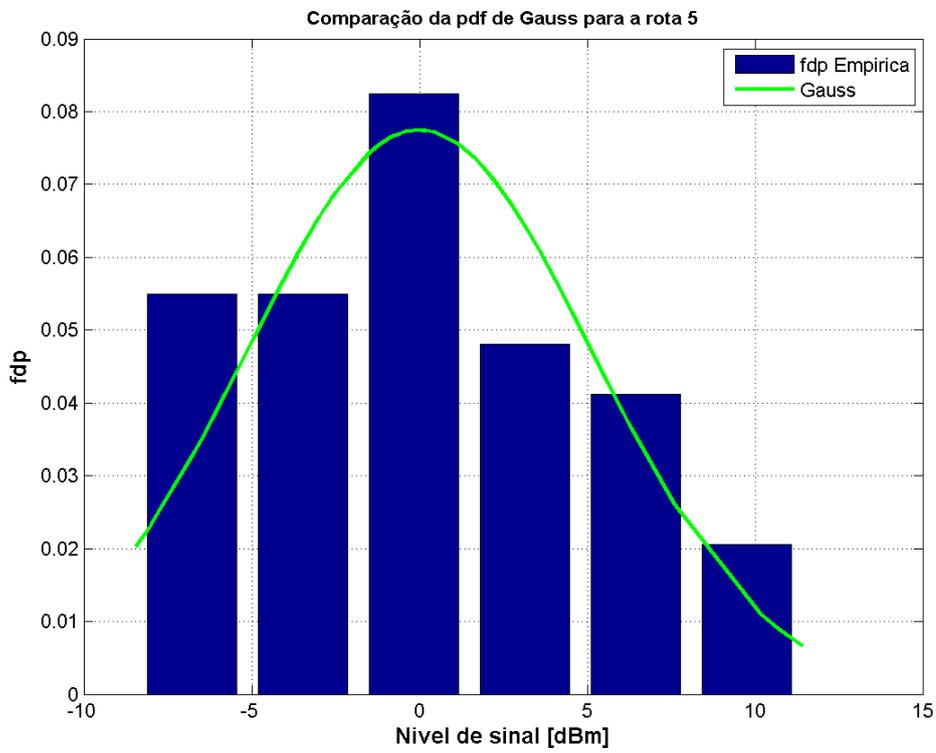


(b) Histograma dos dados empíricos e fdp de Gauss

Figura 5.25: Ajuste do desvanecimento de larga escala na rota 4

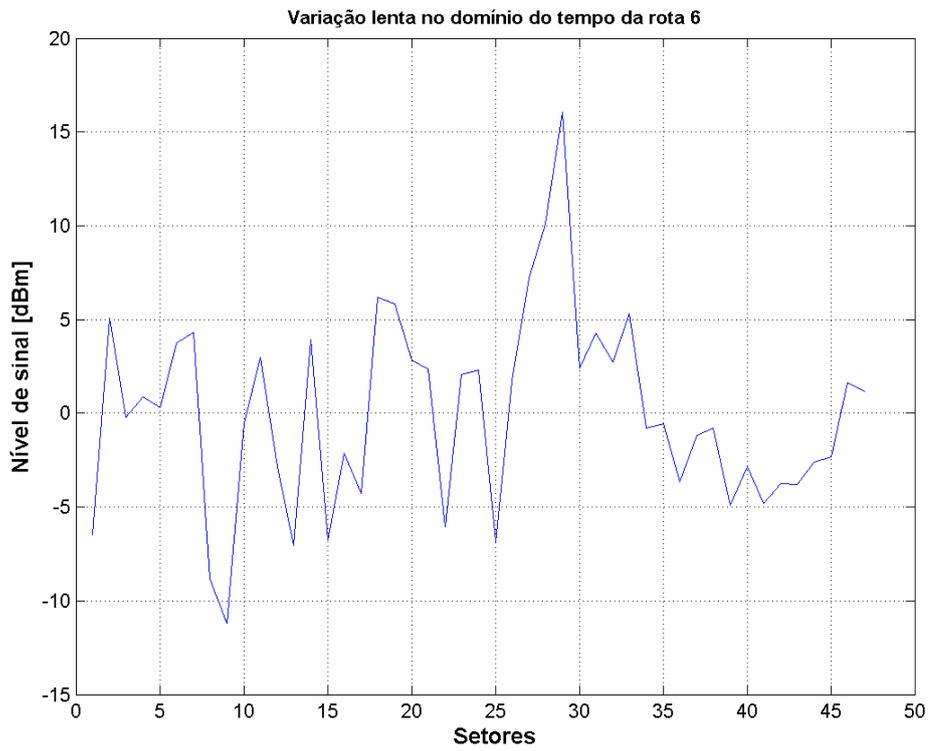


(a) Variação de larga escala do sinal na rota 5

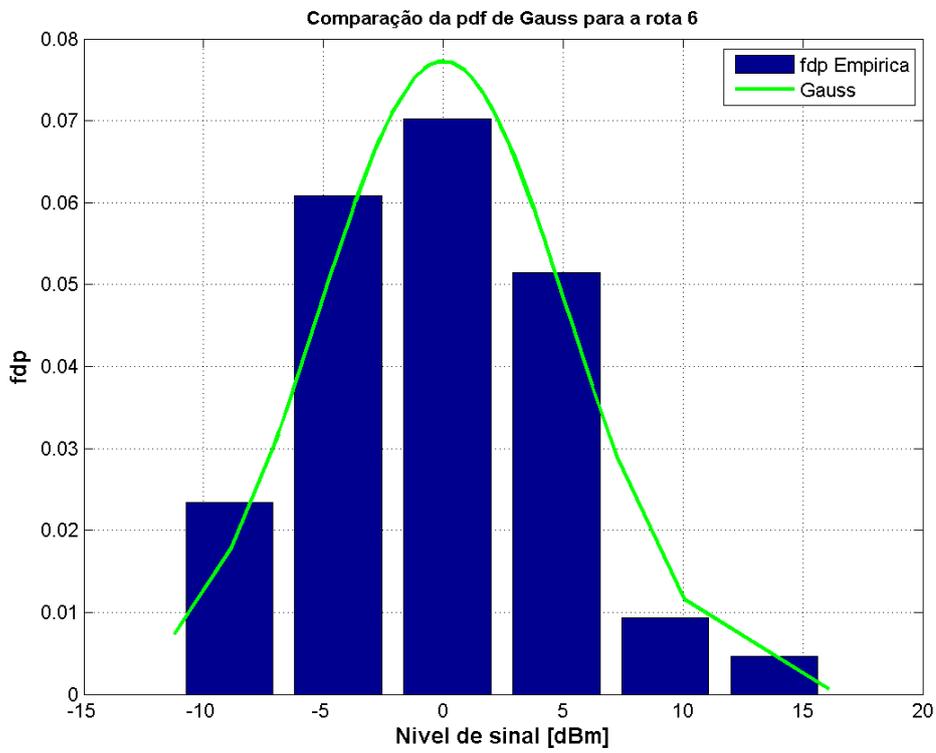


(b) Histograma dos dados empíricos e fdp de Gauss

Figura 5.26: Ajuste do desvanecimento de larga escala na rota 5

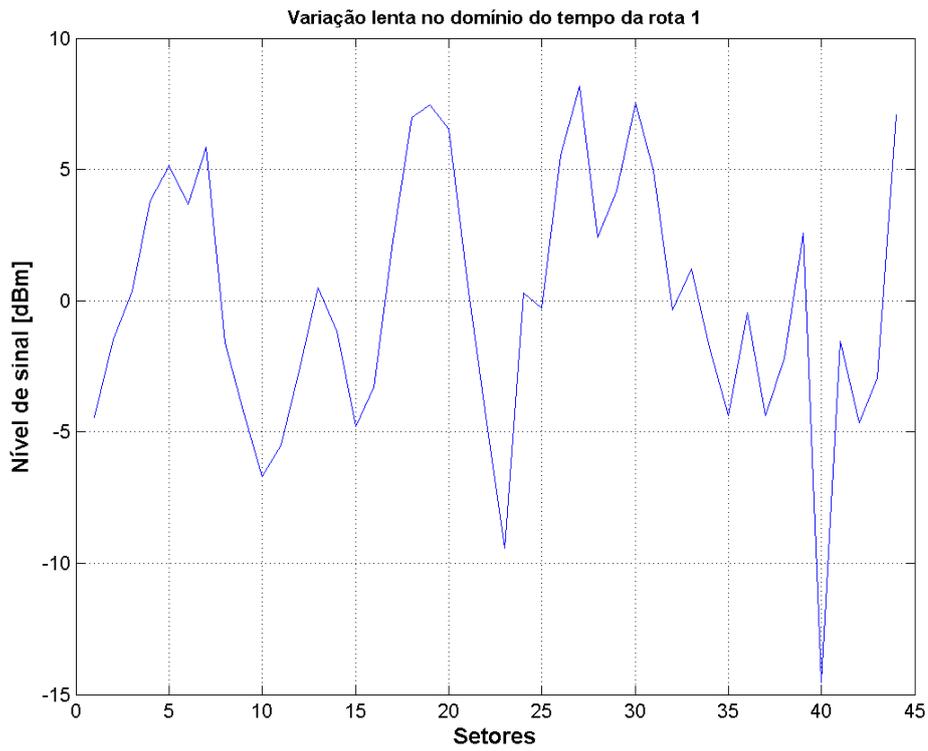


(a) Variação de larga escala do sinal na rota 6

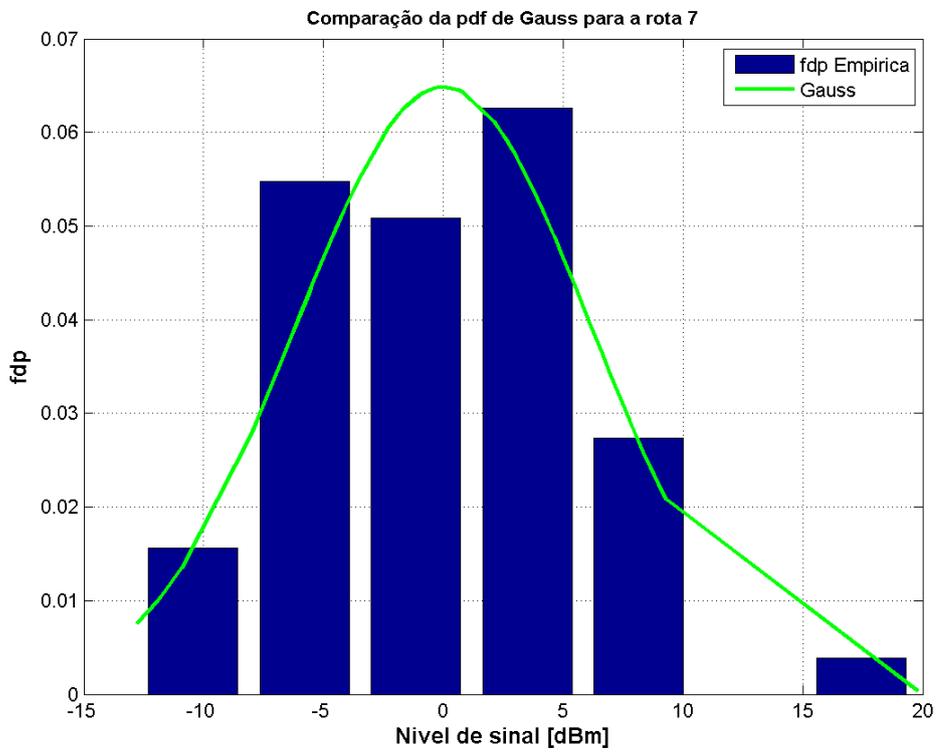


(b) Histograma dos dados empíricos e fdp de Gauss

Figura 5.27: Ajuste do desvanecimento de larga escala na rota 6



(a) Variação de larga escala do sinal na rota 7



(b) Histograma dos dados empíricos e fdp de Gauss

Figura 5.28: Ajuste do desvanecimento de larga escala na rota 7

O resultado do ajuste para todas as rotas, sugere, conforme dados experimentais [21] já têm demonstrado, uma boa adequação à fdp gaussiana.

Este ajuste pode ser verificado, também, através dos valores do teste qui-quadrado apresentados na tabela 5.9, juntamente com a informação de visada (LOS) ou sem visada (NLOS) entre o transmissor e o receptor. O método do qui-quadrado (χ^2) permite avaliar a aderência de valores medidos (ou valores observados) às distribuições conhecidas. Isto é feito, comparando-se os valores esperados com os valores observados na prática.

Tabela 5.9: Características das rotas sondadas, resultado do teste χ^2 para o desvanecimento de larga escala

Rota	Visibilidade	Passou no teste χ^2 ?	Valor do teste χ^2
1	LOS	Sim	0,0419
2	NLOS	Sim	0,0527
3	LOS/NLOS	Sim	0,0480
4	LOS	Sim	0,3268
5	NLOS	Sim	0,0262
6	NLOS	Sim	0,0090
7	NLOS	Sim	0,0217

5.5 Sumário

Neste capítulo foram apresentados todos os resultados da análise estatística da variabilidade do sinal medido, onde se apresentou a distribuição que melhor se ajustou para cada rota do ambiente estudado, tanto para variação de larga escala como a de pequena escala. Além disso, a taxa de cruzamento de nível, duração média de desvanecimento e a reta de melhor ajuste para a perda no percurso, bem como o fator de atenuação, também foram apresentados.

Na seção de preparação dos dados, foi explicado como foi realizada a filtragem dos dados obtidos, de forma a analisar cada fator que compõe o sinal separadamente, definindo uma janela móvel com extensão de 30 comprimentos de onda para a filtragem dos dados.

Capítulo 6

Conclusão

Neste trabalho foi apresentado o resultado do estudo da análise estatística da variabilidade do sinal em um ambiente de vegetação na frequência de 1,88 GHz, realizado no Jardim Botânico do Rio de Janeiro, por meio da obtenção e análise de dados experimentais. Nesta análise, foram incluídas as distribuições mais comumente utilizadas na literatura para descrever a variação de pequena escala de um sinal desvanecido – Gauss, Rayleigh, Rice e Nakagami, bem como a distribuição $\alpha - \mu$, proposta recentemente. Já para a variação de larga escala se utilizou a distribuição gaussiana.

Além disso, as estatísticas de segunda ordem, como taxa de cruzamento de nível e duração média de desvanecimento associadas às distribuições também foram analisadas.

Outra característica abordada foi a reta de melhor ajuste, para a caracterização da perda no percurso, bem como o fator de atenuação do sinal em cada rota.

Os resultados obtidos para as distribuições foram apresentados de forma qualitativa, pela apresentação de gráficos, e de forma quantitativa, através de tabelas, estas contendo o teste do qui-quadrado realizado para atestar a adequabilidade das distribuições às medidas.

De forma sucinta, os resultados obtidos para o ambiente sondado foram:

Tabela 6.1: Resumo dos resultados para cada rota do ambiente sondado

Rota	Visada	<i>fading</i> de pequena escala	<i>fading</i> de larga escala	Fator de atenuação
1	LOS	$\alpha - \mu$	Gauss	1,28
2	NLOS	$\alpha - \mu$	Gauss	9,19
3	LOS/NLOS	$\alpha - \mu$	Gauss	3,64
4	LOS	Gauss	Gauss	1,27
5	NLOS	$\alpha - \mu$	Gauss	12,97
6	NLOS	$\alpha - \mu$	Gauss	8,28
7	NLOS	$\alpha - \mu$	Gauss	6,34

Na análise da variabilidade de pequena escala, observa-se nos resultados que, excetuando a rota 4 de maiores amplitudes de raios diretos, o melhor ajuste foi à distribuição de Gauss. Todas as seis rotas restantes tiveram a distribuição $\alpha - \mu$ como a que mais vezes se ajustou às medidas. Mesmo na rota 4, ela chegou a passar no teste do qui-quadrado com o menor valor em 17 setores, pouco perdendo para a distribuição gaussiana, que passou 20 vezes. Assim, a distribuição $\alpha - \mu$ se mostrou genérica para a análise da variação de pequena escala tanto em rotas LOS quanto em rotas NLOS e deve ser mais testada em outros tipos de canais. Já a variação de larga escala, parece seguir uma distribuição gaussiana.

Quanto à influência da vegetação na perda de sinal, os grandes valores de fatores de atenuação, entre 6,34 a 12,97, das rotas 2, 5, 6 e 7, se deu ao fato desses fatores terem sido obtidos com o deslocamento do receptor ao longo da rota e não adentrando pela vegetação. Nessas rotas, a variação de potência era elevada para pequena variação de deslocamento, ao contrário do ocorrido nas rotas 1, 3 e 4, onde o deslocamento do receptor ocorreu de forma radial.

Após determinada a reta de melhor ajuste para cada rota, calculou-se a diferença entre a média da pequena área ou setor e a dependência média do sinal com a distância. Por último, a estatística do desvanecimento de larga escala foi determinada para o sinal medido, sendo calculada a fdp equivalente. A variação de larga escala do sinal, assim como o resultado do ajuste para cada rota são apresentados nas figuras 5.22 a 5.28.

No tocante às estatísticas de segunda ordem, a taxa de cruzamento de nível da envoltória de sinal mostrou maior concentração em torno do seu valor eficaz na rota LOS 4, em 15 dos 44 setores da rota 1 com visada, enquanto ficou mais disperso nas rotas NLOS, onde desvanecimentos mais profundos aparecem. Observou-se, dentre as distribuições, que a taxa de cruzamento de nível de Rice foi a que mais se aproximou dos dados experimentais para os setores da rota 1 (LOS) que apresentou desvanecimentos mais profundos, embora com erros. No caso das rotas NLOS, a predominância ocorreu para a taxa de cruzamento de nível e duração média de desvanecimento da distribuição de Rayleigh.

6.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Em se tratando de um assunto vasto, com ampla possibilidade de estudos, os seguintes tópicos podem ser abordados em futuros trabalhos:

- Medições em outros parques urbanos que contenham vegetação. Com estas medições, pode se verificar se a distribuição $\alpha - \mu$ é realmente adequada para expressar o desvanecimento de pequena escala, tanto em rotas LOS quanto NLOS;
- Medições em outras frequências e com variação da altura das antenas. Estas medições podem comparar o desempenho das distribuições em outras frequências, principalmente naquelas em que operam os vários sistemas móveis comerciais: 2,4 GHz, 3,5 GHz, 5,8 GHz, etc, além de propor um modelo de cobertura para parques urbanos;
- Continuação dos estudos para a taxa de cruzamento de nível e duração média de desvanecimento da distribuição $\alpha - \mu$, aplicando os parâmetros estimadores de α e μ , conforme referência [55, 45]. A continuidade deste estudo será de grande valia uma vez que esta distribuição se mostrou genérica para a análise do desvanecimento de pequena escala, tanto em rotas LOS quanto em rotas NLOS; e
- Investigar outras distribuições de probabilidade, propostas mais recentemente, de forma a estender a análise dos estudos, como por exemplo a distribuição $\eta - k$ simétrica [57], $\lambda - \mu$ [56], $\eta - k$ assimétrica [58], $\alpha - k - \mu$ [59], $\alpha - \eta - \mu$ [59] e $\alpha - \eta - k - \mu$ [59].

Referências Bibliográficas

- [1] Barros, H. T. *Distribuições Generalizadas de Desvanecimento de Curto Prazo: Medições de Campo e Validações*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. Universidade de Campinas, Campinas - SP, Brasil, Dezembro de 2008.
- [2] Tamir, T. *On Radio Wave Propagation in Forest Environments*, IEEE Trans., 1967, AP-15, (6), pp. 806-817.
- [3] Ishimaru, A. *Wave Propagation and Scattering in Random Media*, (Academic Press, 1978), Vol. 1.
- [4] Lang, R. H., Altaman, F.J., and Seker, S. *UHF Radiowave Propagation through Forests*. CyberCom Technical Report CTR-117-01, 1988.
- [5] Dal Bello, J. C. R. *Caracterização da Influência da Vegetação nos Sistemas de Comunicações Móveis Celulares em Áreas Urbanas*. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica - Pontifícia Universidade Católica/ J, Rio de Janeiro - RJ, Brasil, Fevereiro de 1998.
- [6] Bertoni, H. L., *Radio Propagation for Modern Wireless Systems*, Prentice Hall PTR, New Jersey, 2000.
- [7] Rolim, T. H. P., Vono, A. O., et al. *Um Método para Síntese e Análise dos Principais Efeitos de Propagação em Canais de Rádio Móvel*, INATEL, Revista Científica Periódica - Telecomunicações - volume 05 - numero 01 - junho de 2002.
- [8] D. Parsons, *The Mobile Radio Propagation Channel*, New York: John Wiley & Sons 1992.

- [9] 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.
- [10] Okumura, Y, et al. *Field strength and its Variability in UHF and VHF Land-Mobile Radio Service*. Rev. Elec. Commun. Lab. Vol. 16. 1968.
- [11] Hata, M. *Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services*, IEEE Trans. Veh. Technol. Aug de 1980, Vol. 29, 3, agosto, 1980, pp. 317-325.
- [12] Lee, W.C.Y. *Mobile Communications Engineering*. New York: Mc Graw Hill, 1982.
- [13] Ibrahim, M; Parsons J. *Signal Strength Prediction in built-up Areas. Part I: Median Signal Strength*, IEE Proc., 130, F, -5,. 1983, pp. 377-384.
- [14] Bertoni, H.L.; Walfisch, J. *A Theoretical Model of UHF Propagation in Urban Environments*, IEEE Trans. Antennas Propagat. december de 1988, Vol. 36, 12, pp. 1788-1796.
- [15] Matos, L. J. *Influência da Vegetação na Dispersão dos Sinais Rádio-Móveis* Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Departamento de Engenharia Elétrica. Pontifícia Universidade Católica/RJ, Rio de Janeiro - RJ, Brasil, Setembro de 2005.
- [16] Silva, V. A. *Modelagem Computacional de Canais de Comunicação Móvel*. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo - SP, Outubro de 2004.
- [17] Theodore S. Rappaport *Wireless Communications – Principles & Practice*, Prentice Hall Communications Engineering and Emerging Technologies Series, 1996.
- [18] Meza, W. D. T. *Análise por Simulação do padrão CDMA IS-95*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Telecomunicações) - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. Universidade Federal Fluminense, Niterói - RJ, Agosto de 2008.
- [19] Yacoub, Michel Daoud *Foundations of Mobile Radio Engineering*, CRC Press, New York, 1993.
- [20] Clarke, R. H. *A Statistical Theory of Mobile Radio Reception*. Bell System Technical Journal, vol. 47, p.957-1000, July 1968.

- [21] Jakes, W. C. *Microwave Mobile Communications*, New York: Wiley, 1974.
- [22] Pop, M. and Beaulien, N. C. *Limitations of Sum-of-Sinusoids Fading Channel Simulators*. IEEE Transactions on Communications, vol. 49, no. 4, p. 699-708, Apr. 2001.
- [23] Aulin, Tor. *A modified Model for the Fading Signal at a Mobile Radio Channel*. IEEE Transactions on Vehicular Technology. vol. VT-16, no. 1, p. 10-14. Oct. 1967.
- [24] Vásquez, E. J. A. *Estudo de Cobertura de Sistemas Móveis Celulares em Regiões Urbanas*, Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)- Departamento de Engenharia Elétrica PUC/Rio, Pontifícia Universidade Católica - RJ, Rio de Janeiro - RJ, Brasil, Janeiro de 1996.
- [25] Recommendation ITU-R P.1057-1. *Probability distributions relevant to radiowave propagation modelling (1994-2001)*.
- [26] Leon-Gracia, A. *Probability and Random Processes for Electrical Engineering*, second edition, Addison-Wesley Publishing Company, 1994.
- [27] Lord Rayleigh, J. W. S. *Phil. Mag.*, 73(10), 1880.
- [28] Pawsey, J. L. *Proc. Camb. Phil. Soc.*, 31(125), 1935.
- [29] Rice, S. O. *Mathematical Analysis of Random Noise*. Bell System Technical Journal, 23:282-332, Julho de 1944.
- [30] Renan, S. D. *Estatísticas de Ordem Superior para a Distribuição $k - \mu$* . Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Instituto Nacional de Telecomunicações, Santa Rita do Sapucaí - MG, Brasil, Dezembro de 2003.
- [31] A. Abdi, K. Wills, H. Allen Barger, M. Slim Alouini, and M. Kaveh *Comparasion of the Level Crossing Rate and Average Fade Duration of Rayleigh, Rice, and Nakagami Fading Models with Mobile Channel Data*. IEEE, 2000.
- [32] Gonçalves, J. V. O. *Variabilidade do Sinal, Banda de Coerência e Espalhamento Temporal em Ambiente de Rádio Propagação Móvel em 3,5 GHz*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Departamento de Engenharia Elétrica PUC/RJ. Pontifícia Universidade Católica - RJ, Rio de Janeiro - RJ, Brasil, Setembro de 2009.

- [33] Yacoub, M. D. *Fading Distributions and Co-Channel Interference in Wireless Systems*. IEEE Antennas and Propagations Magazine, Vol.42, No. 1, pag. 150-159, Fevereiro de 2000.
- [34] M. Nakagami, *The m -distribution - A general formula of intensity distribution of rapid fading*, *Statistical Methods in Radio Wave Propagation*, pp. 3–36, 1960, W. G. Hoffman, Ed. Oxford, U.K.: Pergamon.
- [35] I. Gradshteyn and I. Ryzhik, *Tables of Integrals, Series, and Products*. New York: Academic Press, 1980.
- [36] W. Braun and U. Dersh. *A Physical Mobile Radio Channel Model*. IEEE Trans. Vehicular Tech., N0. 2, May, 1991.
- [37] U. Dershand R. Rüg. *Simulations of the Time Frequency outdoor Mobile Radio Channel*. IEEE Trans. Vehicular Technology, Vol. 42. No 3, August 1993.
- [38] H. Suzuki, *A Statistical Model of Urban Radio Propagation*, IEEE Trans. Commun., vol. 25,no. 7, pp. 673–680, July 1977.
- [39] Gomes, R. A. *Comportamento do Sinal de Rádio em Ambientes Móveis Microcelulares*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Departamento de Engenharia Elétrica PUC/RJ. Pontifícia Universidade Católica - RJ, Rio de Janeiro - RJ, Brasil, Setembro de 1999.
- [40] Souza, R. A. A. *Contribuições Teóricas para o Estudo de Funções de Distribuição Correlacionadas em um Canal sem Fio*. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. Universidade de Campinas, Campinas - SP, Brasil, Maio de 2009.
- [41] Spiegel, M. R. *Manual de Fórmulas e Tabelas Matemáticas*. Coleção Schaum, McGraw Hill, 1973.
- [42] S. Stein, *Fading channel issues in system engineering*, IEEE J. Selected Areas in Commun., vol. 5, no. 2 , pp. 68-69, Feb. 1987.
- [43] W. R. Braun and U. Dersch. *A physical mobile radio channel model*, IEEE Trans. Veh. Technol. vol. 40, no. 2, pp. 472-482, May 1991.

- [44] M. D. Yacoub, *The $\alpha - \mu$ distribution: a general fading distribution*, in Proc. IEEE Inter. Symp. on Personal, Indoor and Mobile Radio Commun., vol. 2, pp. 629–633, Sept. 2002.
- [45] —, *The $\alpha - \mu$ distribution: a physical fading model for the Stacy distribution*, in IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 56, no. 1, pp. 27-34, Jan. 2007.
- [46] Stacy, E.W. *A Generalization of the Gamma Distribution*. Annals of Mathematical Statistics 33(3): 1187-1192, 1962.
- [47] Costa, D. B., Filho, C. S. S., Yacoub, M. D. and Fraidenraich, G. *Crossing rates and Fade durations for Diversity-Combining Schemes over $\alpha - \mu$ Fading Channels*. IEEE Trans. On Wireless Communications, Vol.6, no 11, November 2007.
- [48] Leni J. Matos and Gláucio L. Siqueira, *Time and Frequency Dispersion Parameters Measurements at 1,88 GHz in a Vegetated Channel*. Journal of Communication and Information Systems, Vol. 24, No. 1, 2009.
- [49] Vieira, P. A. *Análise da Resposta em Banda Estreita de um Canal Marítimo na Faixa de 3,5 GHz*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Telecomunicações) - Universidade Federal Fluminense, Niterói - RJ, Brasil, Junho de 2010.
- [50] Urei, A. *Erros in Estimating Local Average Power of Multipath Signals*. IEEE Electronic Letters, vol. 27, no. 4, pp. 315-317, Fevereiro de 1991.
- [51] Papoulis, Athanasios. *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*. New York : McGraw-Hill, 2001.
- [52] Lee, W. C. Y. *Estimate of Local Power of a Mobile Radio Signal*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. VT-34, no. 1, Fevereiro de 1985.
- [53] Afric, W.; Zovko-Cihlar, B.; Grgic, S. *Methodology of Path Loss Calculation using Measurement Results*, IEEE 2007.
- [54] Dahad, M.A.A.; Kamel, H.M. *Methodology for calculating Path Loss Upper and Lower Bounds for WiMAX*, IEEE.
- [55] Dias, U. S. *Distribuição de Fase e Estatísticas Correlacionadas em Ambientes Sem Fio: Teoria e Validação Experimental*. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) -

Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. Universidade de Campinas, Campinas - SP, Brasil, Março de 2010.

- [56] Fraidenraich, G.; Yacoub, M. D. *The $\lambda - \mu$ general fading distribution*. SBMO/IEEE International Microwave and Optoelectronics Conference, IMOC 2003, Foz do Iguaçu, Brasil, Setembro de 2003.
- [57] Yacoub, M. D.; Fraidenraich, G.; Tercius, H. B.; Martins, F. C. *The Symmetrical $\eta - k$ Distribution: A General Fading Distribution*. IEEE Transactions On Broadcasting, vol. 51, no. 4, Dezembro de 2005.
- [58] Yacoub, M. D.; Fraidenraich, G.; Tercius, H. B.; Martins, F. C. *The Asymmetrical $\eta - k$ Distribution*. SBrT/IEEE Journal of Communication and Information Systems, vol. 20, no. 3, pp. 182-187, Dezembro de 2005.
- [59] Fraidenraich, G.; Yacoub, M. D. *The $\alpha - \eta - \mu$ and $\alpha - k - \mu$ Fading Distributions*. IEEE International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications, ISSSTA 2006, Manaus, Brasil, Agosto de 2006.

Apêndice A

Tabelas com Resultados

Para facilitar a apresentação dos resultados descritos no capítulo 5, foram exibidos, na tabela 5.8, apenas os resultados da rota 4, com os valores do teste qui-quadrado detalhados para cada distribuição em cada setor. Sendo assim, neste apêndice as tabelas para as demais rotas são apresentadas.

Tabela A.1: Valores do teste qui-quadrado para cada fdp em cada setor da rota 1

Setor	QUI Gauss	QUI Ray	QUI Rice	k	QUI Nak	m	QUI $\alpha - \mu$	α
1	13.44	9.62	9.62	0.0	8.52	0.9	8.01	1.4
2	9.74	10.76	10.76	0.0	9.11	0.8	9.04	19.4
3	2.20	3.18	2.55	1.0	3.41	1.0	2.11	4.5
4	11.92	19.23	13.20	2.0	18.73	1.2	9.85	7.5
5	9.70	8.59	8.59	0.0	5.13	0.7	4.13	1.0
6	16.74	27.48	19.79	2.0	28.99	1.1	10.66	18.1
7	7.11	12.27	6.24	3.0	9.09	1.3	7.70	3.2
8	4.38	3.09	3.09	0.0	1.53	0.8	1.34	1.4
9	3.22	8.02	3.08	2.0	5.94	1.4	1.76	9.5
10	9.44	30.19	8.80	4.0	22.76	1.4	12.83	5.2
11	4.72	6.75	4.77	1.0	6.68	1.2	3.97	8.3
12	5.64	18.92	6.57	4.0	13.54	1.4	9.35	4.6
13	3.12	5.40	3.22	1.0	4.10	1.2	3.17	3.4
14	3.51	10.23	3.35	2.0	7.66	1.3	4.13	5.3
15	11.77	32.38	13.48	3.0	29.34	1.3	12.25	9.2
16	9.10	15.96	8.13	2.0	11.83	1.3	9.67	3.7
17	7.74	27.82	10.15	3.0	24.79	1.2	7.91	9.6
18	8.05	14.86	9.04	2.0	14.18	1.2	5.59	6.5
19	11.18	39.68	12.64	3.0	28.79	1.4	16.62	4.6
20	12.21	12.38	11.47	1.0	13.36	1.0	8.91	12.3
21	5.83	7.85	7.29	1.0	7.97	1.0	5.60	3.4
22	5.94	5.75	5.75	0.0	5.92	0.9	2.99	9.5
23	1.76	1.08	1.08	0.0	0.80	0.9	0.83	3.0
24	3.32	9.02	3.24	3.0	6.60	1.4	2.89	7.3
25	17.44	20.37	17.03	1.0	20.96	1.1	9.43	17.7
26	12.21	18.70	11.87	2.0	17.42	1.2	13.06	7.9
27	12.46	27.77	15.01	2.0	26.58	1.2	12.50	7.0
28	6.37	5.09	5.09	0.0	5.36	1.0	5.39	3.2
29	7.49	9.16	6.98	2.0	8.40	1.4	4.58	14.5
30	2.43	1.48	1.48	0.0	1.53	1.0	1.53	3.3
31	1.66	6.91	1.81	3.0	4.63	1.4	2.57	4.2
32	3.13	5.69	4.61	1.0	6.23	1.0	3.67	8.3
33	2.13	2.04	1.44	1.0	2.05	1.1	1.53	4.9
34	9.52	2.98	2.98	0.0	2.18	0.8	2.18	1.9
35	1.96	2.65	1.72	1.0	2.37	1.2	1.42	4.9
36	5.08	4.37	4.37	0.0	3.09	0.8	3.67	7.9
37	1.84	2.05	1.56	1.0	2.06	1.1	1.65	3.9
38	8.59	7.82	7.64	1.0	7.86	1.1	7.62	2.6
39	3.83	3.31	2.81	1.0	3.01	1.2	3.03	2.8
40	2.78	13.32	3.41	4.0	9.66	1.4	3.43	7.5
41	2.35	3.85	2.42	1.0	3.57	1.2	2.48	5.3
42	2.48	8.66	2.59	3.0	5.67	1.4	2.91	4.7
43	1.53	5.74	1.49	3.0	2.57	1.5	1.70	3.4
44	4.02	12.62	4.15	3.0	9.88	1.4	3.92	8.6

Obs.: NaN indica que a fdp não passou no teste qui-quadrado.

Tabela A.2: Valores do teste qui-quadrado para cada fdp em cada setor da rota 2

Setor	QUI Gauss	QUI Ray	QUI Rice	k	QUI Nak	m	QUI $\alpha - \mu$	α
1	8.05	13.27	13.27	0.0	10.37	0.8	3.16	10.1
2	17.21	NaN	NaN	0.0	4.55	0.5	1.78	0.1
3	NaN	NaN	NaN	0.0	68.59	0.5	0.93	0.1
4	NaN	NaN	NaN	0.0	20.44	0.5	0.92	0.6
5	NaN	NaN	NaN	0.0	NaN	0.5	0.84	0.4
6	NaN	NaN	NaN	0.0	7.69	0.5	1.22	0.5
7	NaN	NaN	NaN	0.0	9.85	0.5	1.24	0.6
8	NaN	NaN	NaN	0.0	NaN	0.5	1.18	0.4
9	NaN	NaN	NaN	0.0	NaN	0.5	1.26	0.3
10	NaN	43.97	43.97	0.0	4.63	0.7	1.50	0.8
11	49.64	11.82	11.82	0.0	2.42	0.7	1.03	1.3
12	NaN	NaN	NaN	0.0	2.75	0.6	1.59	1.2
13	NaN	NaN	NaN	0.0	43.38	0.5	1.19	0.6
14	NaN	NaN	NaN	0.0	5.25	0.6	1.11	0.8
15	17.65	7.71	7.71	0.0	2.00	0.8	0.89	1.2
16	NaN	NaN	NaN	0.0	3.48	0.5	0.66	0.8
17	NaN	NaN	NaN	0.0	5.68	0.5	0.83	0.8
18	NaN	NaN	NaN	0.0	22.79	0.5	0.58	0.4
19	NaN	NaN	NaN	0.0	6.57	0.5	0.59	0.9
20	NaN	NaN	NaN	0.0	3.48	0.5	0.82	0.8
21	NaN	48.10	48.10	0.0	2.21	0.6	0.65	1.1
22	7.18	6.86	6.86	0.0	1.30	0.7	1.19	1.7
23	NaN	35.94	35.94	0.0	1.07	0.7	0.75	1.7
24	NaN	NaN	NaN	0.0	10.96	0.5	0.71	1.0
25	NaN	NaN	NaN	0.0	NaN	0.5	1.03	0.4
26	NaN	8.83	8.83	0.0	2.17	0.7	1.85	1.8
27	NaN	2.88	2.88	0.0	3.01	1.0	33.33	2.0
28	3.19	2.07	2.07	0.0	1.08	0.8	1.04	2.8
29	3.65	4.54	4.54	0.0	0.74	0.7	0.78	2.1
30	3.91	7.17	7.17	0.0	0.90	0.6	0.87	2.9
31	7.25	7.86	7.86	0.0	0.88	0.7	0.84	1.9
32	6.93	16.36	16.36	0.0	1.27	0.5	1.28	2.3
33	3.96	4.48	4.48	0.0	0.59	0.7	0.62	2.0
34	3.02	7.21	7.21	0.0	1.51	0.7	1.07	3.0
35	5.38	6.45	6.45	0.0	3.77	0.8	1.45	8.8
36	20.12	37.78	37.78	0.0	1.25	0.6	0.73	1.4
37	4.27	7.44	7.44	0.0	0.74	0.6	0.88	2.4
38	4.88	16.62	16.62	0.0	4.29	0.6	1.80	4.7
39	3.97	8.15	8.15	0.0	0.56	0.6	0.57	2.4
40	9.72	31.22	31.22	0.0	2.03	0.5	1.31	1.2
41	4.49	7.22	7.22	0.0	1.08	0.7	0.96	2.3
42	2.12	4.14	4.14	0.0	1.51	0.8	0.91	3.7
43	3.20	8.83	8.83	0.0	1.30	0.6	0.92	4.5
44	3.71	8.84	8.84	0.0	4.98	0.8	1.81	6.5
45	1.93	2.52	2.52	0.0	2.39	0.9	0.82	5.7
46	18.42	31.69	31.69	0.0	3.12	0.6	2.38	1.3
47	4.42	13.17	13.17	0.0	1.21	0.6	1.05	3.7
48	4.99	12.84	12.84	0.0	2.01	0.6	2.04	2.4
49	2.95	5.26	5.26	0.0	0.97	0.7	0.71	4.3
50	2.61	1.99	1.99	0.0	1.13	0.8	1.16	2.6
51	2.90	2.37	2.37	0.0	1.17	0.8	1.17	2.5
52	4.69	7.42	7.42	0.0	1.77	0.6	2.02	2.6
53	4.32	4.40	4.40	0.0	1.44	0.7	1.42	2.0
54	4.12	4.79	4.79	0.0	1.96	0.7	2.15	4.9
55	5.81	2.77	2.77	0.0	2.79	1.1	2.95	2.0
56	3.88	4.76	4.28	1.0	5.14	1.0	3.75	5.7

Obs.: NaN indica que a fdp não passou no teste qui-quadrado.

Tabela A.3: Valores do teste qui-quadrado para cada fdp em cada setor da rota 3

Setor	QUI Gauss	QUI Ray	QUI Rice	k	QUI Nak	m	QUI $\alpha - \mu$	α
1	1.59	16.53	2.14	4.0	9.76	1.5	4.13	5.6
2	2.85	9.74	2.68	3.0	5.39	1.5	3.70	3.7
3	4.42	2.87	2.87	0.0	1.89	0.8	1.95	1.9
4	7.15	4.71	4.71	0.0	4.90	1.1	5.36	2.5
5	4.18	6.41	5.04	1.0	6.89	1.0	2.91	6.0
6	3.59	1.44	1.44	0.0	1.34	0.9	1.28	1.7
7	2.87	4.24	2.77	2.0	3.43	1.3	2.87	4.2
8	6.24	8.83	8.83	0.0	2.34	0.6	2.73	2.9
9	3.61	2.47	2.47	0.0	2.32	0.9	2.38	2.9
10	2.24	6.83	2.07	3.0	3.61	1.5	2.71	3.6
11	2.51	2.84	2.71	1.0	2.94	1.0	1.63	4.7
12	3.14	3.70	3.49	1.0	3.80	1.0	2.12	5.1
13	2.05	1.91	1.91	0.0	1.28	0.8	1.21	2.9
14	3.24	1.68	1.68	0.0	0.90	0.8	0.80	1.7
15	2.58	1.00	1.00	0.0	0.77	0.9	0.81	2.1
16	6.42	1.43	1.43	0.0	1.46	1.0	1.48	2.0
17	1.92	0.94	0.94	0.0	0.95	1.0	0.94	2.9
18	4.03	1.77	1.77	0.0	1.77	1.0	1.78	1.9
19	2.80	1.95	1.95	0.0	1.08	0.8	1.22	2.4
20	6.53	23.91	23.91	0.0	1.72	0.5	1.72	1.7
21	2.76	2.97	2.97	0.0	1.39	0.8	1.39	4.0
22	3.57	1.98	1.98	0.0	1.48	0.8	1.42	1.8
23	17.89	NaN	NaN	0.0	3.24	0.5	1.69	0.8
24	2.08	2.04	1.58	1.0	1.91	1.1	1.63	3.1
25	4.58	3.77	3.77	0.0	2.63	0.8	2.93	5.1
26	2.68	4.71	2.31	2.0	3.73	1.3	2.17	8.0
27	1.42	4.80	1.63	2.0	3.70	1.3	1.79	4.6
28	3.33	4.83	3.19	2.0	3.83	1.2	3.37	3.2
29	1.83	10.08	2.21	3.0	7.21	1.4	2.73	7.0
30	5.07	2.73	2.73	0.0	2.60	0.9	2.78	2.2
31	5.37	2.97	2.97	0.0	3.00	1.0	3.21	2.0
32	3.54	4.24	3.71	1.0	4.61	1.0	1.78	8.4
33	3.20	3.78	2.73	1.0	2.29	1.4	2.29	2.4
34	2.26	5.63	2.79	2.0	5.21	1.2	2.86	4.7
35	2.62	15.74	3.82	3.0	11.56	1.4	4.90	5.7
36	5.59	25.50	5.60	4.0	17.93	1.4	7.66	6.0
37	4.73	5.24	3.95	1.0	4.41	1.2	4.48	3.6
38	1.62	7.04	1.93	2.0	5.12	1.3	1.73	5.6
39	5.20	4.34	4.20	1.0	4.59	1.1	5.37	11.9
40	1.84	5.35	1.89	2.0	4.06	1.3	1.06	7.0
41	7.71	21.03	21.03	0.0	2.96	0.5	1.97	9.5
42	3.77	6.55	6.55	0.0	5.33	0.8	2.62	4.7
43	3.52	2.08	2.08	0.0	2.07	1.1	2.35	3.4
44	3.65	1.46	1.46	0.0	1.49	1.0	1.90	2.7
45	13.28	18.86	18.86	0.0	15.75	0.8	4.71	15.3
46	1.68	19.69	1.81	5.0	8.62	1.8	2.13	5.8
47	2.53	4.05	4.05	0.0	3.54	0.9	2.60	3.7
48	1.13	2.15	0.98	1.0	1.57	1.2	1.01	3.2
49	2.52	3.74	3.74	0.0	2.15	0.8	0.78	6.2
50	1.70	3.12	3.12	0.0	1.57	0.8	0.75	3.6
51	3.82	3.99	3.99	0.0	1.01	0.7	0.91	2.3
52	2.82	0.96	0.96	0.0	0.96	1.0	1.03	2.1
53	30.05	54.20	54.20	0.0	1.00	0.6	0.58	1.5
54	13.96	52.35	52.35	0.0	2.00	0.5	1.01	1.0
55	1.67	2.45	1.23	1.0	1.42	1.3	1.09	4.0
56	3.71	1.23	1.23	0.0	1.10	1.1	0.91	1.6
57	1.84	13.96	1.98	4.0	5.56	1.7	1.38	5.7
58	3.99	2.62	2.62	0.0	2.77	1.0	2.75	6.6
59	4.21	1.59	1.59	0.0	1.25	1.2	1.08	1.7
60	0.98	2.37	0.86	1.0	1.41	1.2	0.70	3.1
61	3.16	5.86	2.30	2.0	2.28	1.4	2.09	2.3
62	6.03	2.60	2.60	0.0	1.45	0.8	1.38	1.8
63	1.44	5.48	1.51	2.0	3.69	1.3	0.88	4.7
64	4.88	8.08	3.54	2.0	2.18	1.6	2.13	1.9
65	2.49	10.05	2.33	3.0	2.78	1.7	1.77	3.6

Obs.: NaN indica que a fdp não passou no teste qui-quadrado.

Tabela A.4: Valores do teste qui-quadrado para cada fdp em cada setor da rota 5

Setor	QUI Gauss	QUI Ray	QUI Rice	k	QUI Nak	m	QUI $\alpha - \mu$	α
1	2.64	5.60	2.82	2.0	4.95	1.2	3.01	4.9
2	3.16	4.86	4.86	0.0	2.73	0.8	1.86	8.2
3	2.74	3.28	3.28	0.0	2.67	0.9	1.34	5.3
4	3.80	3.58	3.58	0.0	1.36	0.8	1.31	2.1
5	4.32	11.73	11.73	0.0	1.33	0.6	1.22	2.7
6	4.67	15.81	15.81	0.0	1.87	0.6	1.37	5.7
7	3.02	5.61	5.61	0.0	1.97	0.7	1.36	3.3
8	3.27	4.12	4.12	0.0	0.69	0.7	0.71	2.1
9	2.46	3.93	3.93	0.0	2.50	0.8	1.19	4.2
10	5.69	15.06	15.06	0.0	0.92	0.6	0.92	2.0
11	6.49	6.80	6.80	0.0	1.61	0.7	1.50	1.8
12	2.54	1.18	1.18	0.0	1.21	1.0	1.37	2.8
13	7.17	5.13	5.13	0.0	2.22	0.7	2.10	1.8
14	3.44	1.31	1.31	0.0	1.13	0.9	1.13	2.3
15	2.53	2.64	2.35	1.0	2.71	1.0	2.11	3.1
16	1.80	3.10	3.10	0.0	1.58	0.8	0.98	4.0
17	3.33	6.42	6.42	0.0	1.18	0.7	0.99	3.5
18	3.73	6.56	6.56	0.0	1.03	0.7	1.10	3.0
19	4.94	3.56	3.56	0.0	1.07	0.7	0.99	1.7
20	11.27	8.06	8.06	0.0	1.10	0.7	0.61	1.4
21	5.51	6.34	6.34	0.0	1.67	0.7	1.76	1.9
22	5.31	11.02	11.02	0.0	0.92	0.6	0.98	2.5
23	3.62	8.00	8.00	0.0	0.77	0.6	0.70	3.0
24	NaN	NaN	NaN	0.0	3.23	0.5	1.23	1.1
25	10.53	NaN	NaN	0.0	0.76	0.5	0.78	2.0
26	9.24	37.95	37.95	0.0	1.21	0.5	1.22	2.1
27	NaN	NaN	NaN	0.0	5.22	0.5	0.82	1.1
28	19.65	NaN	NaN	0.0	1.61	0.5	0.96	1.3
29	3.12	2.25	2.25	0.0	0.86	0.8	0.75	2.8
30	26.97	NaN	NaN	0.0	1.38	0.5	0.91	1.3
31	11.74	28.04	28.04	0.0	1.49	0.6	0.78	1.2
32	8.19	20.38	20.38	0.0	1.15	0.5	1.01	1.7
33	6.43	5.35	5.35	0.0	1.07	0.7	0.94	1.8
34	33.93	32.59	32.59	0.0	2.77	0.6	1.13	0.9
35	10.66	14.19	14.19	0.0	1.96	0.6	1.24	1.3
36	14.33	30.93	30.93	0.0	1.75	0.6	1.78	1.8
37	32.54	NaN	NaN	0.0	3.10	0.5	0.62	0.6
38	11.94	28.9	28.96	0.0	1.31	0.6	0.79	1.3
39	NaN	NaN	NaN	0.0	4.69	0.5	0.79	0.5
40	9.38	23.37	23.37	0.0	1.31	0.6	0.96	1.5
41	6.68	10.32	10.32	0.0	1.38	0.6	1.25	1.6
42	8.22	11.95	11.95	0.0	1.64	0.6	1.72	2.0
43	34.58	37.52	37.52	0.0	1.56	0.6	0.87	1.3
44	7.56	12.00	12.00	0.0	1.09	0.6	1.14	2.1

Obs.: NaN indica que a fdp não passou no teste qui-quadrado.

Tabela A.5: Valores do teste qui-quadrado para cada fdp em cada setor da rota 6

Setor	QUI Gauss	QUI Ray	QUI Rice	k	QUI Nak	m	QUI $\alpha - \mu$	α
1	NaN	NaN	NaN	0.0	35.24	0.5	0.76	0.6
2	NaN	NaN	NaN	0.0	4.02	0.5	0.86	0.6
3	NaN	NaN	NaN	0.0	NaN	0.5	0.60	0.4
4	NaN	NaN	NaN	0.0	NaN	0.5	0.68	0.2
5	NaN	NaN	NaN	0.0	NaN	0.5	1.02	0.3
6	NaN	NaN	NaN	0.0	NaN	0.5	0.50	0.5
7	NaN	NaN	NaN	0.0	36.81	0.5	0.93	0.4
8	NaN	NaN	NaN	0.0	NaN	0.5	0.89	0.5
9	NaN	NaN	NaN	0.0	6.08	0.5	0.77	0.4
10	18.04	24.42	24.42	0.0	1.81	0.6	1.49	1.5
11	10.21	17.73	17.73	0.0	1.31	0.6	0.86	1.3
12	6.83	9.49	9.49	0.0	1.05	0.6	0.80	1.7
13	10.31	31.54	31.54	0.0	0.93	0.6	0.72	1.6
14	5.60	14.68	14.68	0.0	0.66	0.6	0.66	2.2
15	6.00	11.61	11.61	0.0	0.72	0.6	0.66	1.8
16	2.65	3.72	3.72	0.0	0.73	0.7	0.58	3.1
17	NaN	NaN	NaN	0.0	2.05	0.5	1.30	1.5
18	8.51	25.46	25.46	0.0	8.34	0.6	3.22	11.2
19	5.79	15.66	15.66	0.0	2.39	0.6	2.39	4.6
20	4.97	3.37	3.37	0.0	2.75	0.8	2.85	2.4
21	5.04	9.78	9.78	0.0	1.29	0.6	1.57	2.5
22	3.06	3.00	3.00	0.0	0.83	0.7	0.77	2.5
23	4.63	3.64	3.64	0.0	1.06	0.7	1.03	1.9
24	3.67	7.20	7.20	0.0	2.36	0.7	1.12	5.3
25	5.23	9.56	9.56	0.0	1.56	0.6	1.86	2.2
26	4.44	3.94	3.94	0.0	1.68	0.7	1.53	1.7
27	2.94	1.87	1.87	0.0	1.00	0.8	1.36	3.0
28	2.90	1.86	1.86	0.0	1.64	0.9	1.59	2.5
29	9.69	13.40	13.40	0.0	1.58	0.6	1.51	1.8
30	4.07	5.63	5.63	0.0	0.99	0.7	0.97	2.0
31	2.50	4.07	4.07	0.0	1.07	0.7	1.05	3.1
32	3.82	6.36	6.36	0.0	1.45	0.7	1.35	2.9
33	NaN	NaN	NaN	0.0	3.21	0.5	1.68	1.2
34	3.94	8.02	8.02	0.0	1.44	0.6	1.24	3.1
35	1.88	1.97	1.97	0.0	1.72	0.9	1.17	3.5
36	3.65	7.40	7.40	0.0	1.17	0.6	1.13	3.3
37	3.42	3.14	3.14	0.0	1.42	0.8	1.45	2.6
38	3.57	4.81	4.81	0.0	2.54	0.8	2.35	2.7
39	2.62	1.16	1.16	0.0	1.17	0.9	1.26	2.4
40	3.88	4.13	4.13	0.0	1.12	0.7	1.21	2.4
41	4.29	3.89	3.89	0.0	1.70	0.7	1.81	2.1
42	8.24	11.26	11.26	0.0	1.52	0.6	1.58	2.2
43	2.42	1.14	1.14	0.0	0.89	0.9	0.92	2.3
44	4.26	3.09	3.09	0.0	1.44	0.8	1.44	1.9
45	3.35	1.98	1.98	0.0	1.42	0.8	1.49	2.2
46	8.30	9.92	9.92	0.0	2.21	0.6	2.20	1.8
47	7.46	6.03	6.03	0.0	5.13	0.8	5.42	3.2

Obs.: NaN indica que a fdp não passou no teste qui-quadrado.

Tabela A.6: Valores do teste qui-quadrado para cada fdp em cada setor da rota 7

Setor	QUI Gauss	QUI Ray	QUI Rice	k	QUI Nak	m	QUI $\alpha - \mu$	α
1	13.29	9.48	9.48	0.0	8.09	0.8	7.96	1.6
2	4.00	3.73	3.73	0.0	1.76	0.7	2.21	3.2
3	3.58	3.26	3.26	0.0	1.87	0.8	1.76	2.9
4	3.99	1.74	1.74	0.0	1.46	0.9	1.64	2.3
5	7.65	7.37	7.37	0.0	2.48	0.7	2.02	1.4
6	4.27	2.91	2.91	0.0	2.72	0.9	2.71	2.5
7	4.51	2.99	2.99	0.0	3.04	1.0	3.12	2.5
8	5.92	2.46	2.46	0.0	2.09	0.9	1.84	1.5
9	3.57	1.40	1.40	0.0	1.20	0.9	1.23	1.9
10	4.53	2.26	2.26	0.0	1.61	0.8	1.57	1.9
11	2.15	2.39	2.39	0.0	2.43	1.0	2.00	3.1
12	3.94	5.02	5.02	0.0	1.26	0.7	1.40	2.2
13	3.61	1.88	1.88	0.0	1.72	0.9	1.90	2.4
14	4.06	2.01	2.01	0.0	1.04	0.8	1.08	2.1
15	3.67	2.14	2.14	0.0	2.15	1.1	2.17	2.3
16	3.00	2.43	2.43	0.0	2.47	1.0	2.13	3.4
17	2.50	2.94	2.94	0.0	2.22	0.8	1.15	5.6
18	2.56	1.74	1.74	0.0	1.81	1.0	1.84	3.3
19	14.71	4.95	4.95	0.0	2.53	0.8	1.17	0.9
20	3.36	2.28	2.28	0.0	1.31	0.8	1.44	2.2
21	4.43	4.02	3.51	1.0	3.79	1.1	3.70	2.5
22	3.89	3.62	3.62	0.0	1.59	0.7	1.73	2.6
23	11.18	9.41	9.41	0.0	2.07	0.7	1.26	1.2
24	8.88	11.00	11.00	0.0	5.84	0.6	4.75	5.4
25	15.44	22.64	22.64	0.0	7.22	0.5	6.76	6.7
26	2.40	3.05	3.05	0.0	2.81	0.9	2.37	3.1
27	3.21	5.27	5.27	0.0	4.35	0.9	2.70	5.1
28	6.27	10.30	10.30	0.0	1.97	0.6	1.98	2.4
29	2.78	3.35	3.35	0.0	2.02	0.8	1.78	3.1
30	3.90	7.16	7.16	0.0	1.58	0.6	1.41	3.6
31	5.37	11.37	11.37	0.0	1.40	0.6	1.28	1.6
32	4.86	14.50	14.50	0.0	2.42	0.6	1.57	3.9
33	4.07	8.79	8.79	0.0	2.16	0.6	1.73	4.9
34	2.71	4.95	4.95	0.0	1.58	0.7	1.38	3.4
35	2.48	1.92	1.92	0.0	1.54	0.9	1.37	3.3
36	3.27	5.80	5.80	0.0	1.33	0.7	1.06	3.6
37	3.55	3.13	3.13	0.0	1.36	0.8	1.33	2.8
38	2.48	3.22	3.22	0.0	1.35	0.8	1.25	2.5
39	3.02	3.56	3.56	0.0	1.09	0.7	1.06	3.5
40	2.21	2.69	2.69	0.0	0.83	0.8	0.77	2.5
41	4.58	7.36	7.36	0.0	0.99	0.6	0.94	1.9
42	4.18	7.88	7.88	0.0	1.22	0.6	1.29	3.4
43	2.95	6.82	6.82	0.0	1.11	0.7	0.95	3.9
44	3.88	4.93	4.93	0.0	1.03	0.7	1.09	2.3
45	3.61	4.95	4.95	0.0	0.83	0.7	0.98	2.5
46	6.37	7.96	7.96	0.0	1.30	0.7	1.25	1.9
47	3.98	13.53	13.53	0.0	0.91	0.6	0.94	3.1
48	5.64	15.33	15.33	0.0	1.42	0.6	1.72	4.9
49	10.14	16.23	16.23	0.0	1.25	0.6	1.06	1.6
50	4.79	11.58	11.58	0.0	0.98	0.6	0.94	2.6
51	4.89	13.11	13.11	0.0	1.05	0.6	0.79	3.6
52	52.96	NaN	NaN	0.0	1.76	0.5	1.12	1.4
53	5.45	12.69	12.69	0.0	0.95	0.6	0.95	2.5
54	3.24	6.49	6.49	0.0	0.78	0.7	0.69	2.7
55	4.72	9.71	9.71	0.0	1.13	0.6	1.30	3.0

Obs.: NaN indica que a fdp não passou no teste qui-quadrado.