

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**CARACTERIZAÇÃO DE CANAIS SEM FIO EM
AMBIENTES GENERALIZADOS DE
DESVANECIMENTO**

JÚLIO CÉSAR DE MELLO PINHEIRO

ORIENTADOR: UGO SILVA DIAS

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA**

PUBLICAÇÃO: PPGENE.DM - 476 A/12

BRASÍLIA/DF: JUNHO - 2012.

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**CARACTERIZAÇÃO DE CANAIS SEM FIO EM AMBIENTES
GENERALIZADOS DE DESVANECIMENTO**

JÚLIO CÉSAR DE MELLO PINHEIRO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

APROVADA POR:

**Prof. Ugo Silva Dias, Dr. (ENE-UnB)
(Orientador)**

**Prof. Adoniran Judson de Barros Braga, Dr. (ENE/UnB)
(Examinador Interno)**

**Prof. Leonardo Aguayo, Dr. (FGA/UnB)
(Examinador Externo)**

BRASÍLIA/DF, 25 DE JUNHO DE 2012.

FICHA CATALOGRÁFICA

PINHEIRO, JÚLIO CÉSAR DE MELLO

Caracterização de Canais Sem Fio Em Ambientes Generalizados De
Desvanecimento. [Distrito Federal] 2012.

xvi, 75p.:il.; 297 mm (ENE/FT/UnB, Mestre, Engenharia Elétrica, 2012).

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília.

Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Elétrica.

- | | |
|----------------|-------------------------------|
| 1. Propagação | 2. Distribuições estatísticas |
| 3. Rádio móvel | 4. Desvanecimento |
| I. ENE/FT/UnB | II. Título (série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

PINHEIRO., J. C. de M. (2012). Caracterização de Canais Sem Fio Em Ambientes Generalizados De Desvanecimento. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGENE.DM - 476 A/12, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 75p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Júlio César De Mello Pinheiro.

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Caracterização de Canais Sem Fio Em Ambientes Generalizados De Desvanecimento.

GRAU / ANO: Mestre / 2012

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Júlio César De Mello Pinheiro
Rua Buenos Aires, nº 726, Jardim das Américas.
78.060-634 Cuiabá - MT - Brasil.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso, IFMT, cuja direção viabilizou a realização deste mestrado.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Ugo Silva Dias que, com seus sólidos conhecimentos e experiência, me conduziu na realização deste trabalho. Sei que não tenho como retribuir sua atenção, dedicação e paciência, mas peço a Deus que ilumine ainda mais os seus caminhos, com toda sorte de bênçãos. Um agradecimento especial ao Professor Ugo por ter cedido as medidas de campo que foram utilizadas neste trabalho.

Ao Prof. Dr. Franklin da Costa Silva pela cordialidade e apoio.

Ao Prof. Dr. Ruy de Oliveira e Prof. Dr. Tony Inácio Silva por terem acolhido e tornado realidade a ideia do Minter.

A todos os colegas do Minter por tudo o que compartilhamos durante o curso.

À minha família pelo apoio e paciência, nesses dois anos sem férias e muitas ausências.

À CAPES, pelo apoio financeiro.

Finalmente quero agradecer a Deus, o Senhor de nossas vidas, sem cuja ajuda não teria sucesso nessa empreitada. Obrigado Senhor!

RESUMO

CARACTERIZAÇÃO DE CANAIS SEM FIO EM AMBIENTES GENERALIZADOS DE DESVANECIMENTO

Autor: Júlio César De Mello Pinheiro

Orientador: Prof. Dr. Ugo Silva Dias

Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

Brasília, junho de 2012

Esta dissertação investiga estatísticas de primeira e de segunda ordens de canais sem fio em ambientes generalizados de desvanecimento, por meio de dados práticos obtidos em medições de campo. Comparações são feitas de forma analítica, através de gráficos e tabelas, e quantitativa, por meio de cálculos dos desvios entre as curvas teóricas e práticas. Para o traçado das curvas, bem como para os cálculos, foram empregados estimadores obtidos dos próprios dados colhidos em campo, o que credita maior confiabilidade aos resultados. As distribuições estatísticas utilizadas foram as (a) tradicionais: de Rayleigh, Rice, Nakagami- m e Weibull, e (b) generalizadas: α - μ e κ - μ . As medidas foram realizadas, em ambiente externo, no campus e arredores da Unicamp, com os equipamentos de recepção instalados no interior de um automóvel, sendo que a antena receptora foi posicionada na parte externa do veículo.

Palavras-chave: Medições de campo, desvanecimento, distribuições estatísticas, estimadores

ABSTRACT

WIRELESS CHANNELS CHARACTERIZATION ON GENERAL FADING ENVIRONMENT

Author: Júlio César De Mello Pinheiro

Supervisor: Prof. Dr. Ugo Silva Dias

Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

Brasília, June of 2012

This dissertation investigates statistics of first and second orders of wireless channels in generalized fading environments through practical data obtained from field measurements. Comparisons are made analytically, using graphs and tables, and quantitatively, by means of calculations of the deviations between the theoretical curves and practices. For drawing the curves, as well as the calculations were used estimators obtained from data collected in their own field, who credits the greater reliability of the results. The statistical distributions used were (a) traditional: Rayleigh, Rice, Nakagami- m and Weibull, and (b) generalized κ - μ and α - μ . The measurements were performed in the external environment, on campus and around of Unicamp, with the receiving equipment installed in a car, and the receiving antenna was positioned on the outside of the vehicle.

Keywords: Field measurements, fading, statistical distributions, estimators

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	O CANAL DE COMUNICAÇÃO SEM FIO E A SUA MODELAGEM MATEMÁTICA	1
1.2	A IMPORTÂNCIA DAS MEDIDAS FEITAS EM CAMPO E A SUA OBTENÇÃO	2
1.3	OBJETIVO DA DISSERTAÇÃO	2
1.4	A ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	2
2	MODELAGEM ESTATÍSTICA DO CANAL RÁDIO-MÓVEL	4
2.1	O DESVANECIMENTO	4
2.1.1	Classificações do Desvanecimento	4
2.1.1.1	Desvanecimento em larga escala	4
2.1.1.2	Desvanecimento em pequena escala	5
2.2	MODELOS DE PROPAGAÇÃO	6
2.3	MODELAGEM ESTATÍSTICA	7
2.4	DISTRIBUIÇÕES DA ENVOLTÓRIA DO SINAL	9
2.4.1	Distribuições Tradicionais	10
2.4.1.1	Distribuição de Rayleigh	10
2.4.1.2	Distribuição de Rice	12
2.4.1.3	Distribuição de Nakagami- m	14
2.4.1.4	Distribuição de Weibull	17
2.4.2	Distribuições κ - μ e α - μ	20
2.4.2.1	Distribuição κ - μ	20
2.4.2.2	Distribuição α - μ	23
3	DESCRIÇÃO DAS MEDIDAS DE CAMPO	28
3.1	O AMBIENTE DE PROPAGAÇÃO E O SISTEMA DE MEDIÇÃO	28
4	OS RESULTADOS	33
4.1	INTRODUÇÃO	33
4.2	ESTIMADORES DE PARÂMETROS	35

4.3	RESULTADOS OBTIDOS EM CADA TRAJETO	36
4.3.1	Trajetos 1	36
4.3.2	Trajetos 2	39
4.3.3	Trajetos 3	41
4.3.4	Trajetos 4	44
4.3.5	Trajetos 5	46
4.3.6	Trajetos 6	48
4.3.7	Trajetos 7	50
4.3.8	Trajetos 8	52
4.3.9	Trajetos 9	55
4.3.10	Trajetos 10	57
4.4	ANÁLISE DOS RESULTADOS	59
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	63
5.1	CONCLUSÕES GERAIS	63
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	63
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66
	APÊNDICES	67
A	ESPECIFICAÇÕES DA ESTAÇÃO TRANSMISSORA	68
B	ESPECIFICAÇÕES DA ESTAÇÃO RECEPTORA	72

LISTA DE TABELAS

4.1	Locais das campanhas de medição e arquivos de medidas gerados.	34
4.2	Parâmetros de desvanecimento calculados.	36
4.3	Parâmetros de desvanecimento calculados.	39
4.4	Parâmetros de desvanecimento calculados.	41
4.5	Parâmetros de desvanecimento calculados.	44
4.6	Parâmetros de desvanecimento calculados.	46
4.7	Parâmetros de desvanecimento calculados.	48
4.8	Parâmetros de desvanecimento calculados.	50
4.9	Parâmetros de desvanecimento calculados.	53
4.10	Parâmetros de desvanecimento calculados.	55
4.11	Parâmetros de desvanecimento calculados.	57
4.12	Menores desvios das curvas teóricas em relação às empíricas.	60
4.13	Menores desvios para a autocorrelação.	61

LISTA DE FIGURAS

2.1	Sinal de RF na recepção, submetido a múltiplos fatores de atenuação.	5
2.2	Relação entre a PDF e a CDF de uma população.	8
2.3	Curvas da PDF e da CDF da distribuição Rayleigh.	11
2.4	Distribuição Rayleigh como caso particular de outras distribuições.	11
2.5	Função densidade de probabilidade da distribuição Rice.	13
2.6	Função distribuição de probabilidade da distribuição Rice.	13
2.7	Equivalências entre as Distribuições κ - μ , Rice e Rayleigh.	14
2.8	Função densidade de probabilidade da distribuição Nakagami- m	15
2.9	Função distribuição cumulativa da distribuição de Nakagami- m	16
2.10	Função de autocorrelação da distribuição Nakagami- m	16
2.11	Equivalências da distribuição Nakagami- m	17
2.12	Função densidade de probabilidade da distribuição Weibull.	18
2.13	Função distribuição cumulativa da distribuição Weibull.	18
2.14	Função de autocorrelação da distribuição Weibull.	19
2.15	Equivalências da Distribuição Weibull.	19
2.16	Função densidade de probabilidade da distribuição κ - μ com $\kappa = 1$. Destaque para a coincidência com a distribuição Rice.	21
2.17	Função densidade de probabilidade da distribuição κ - μ com $\mu = 0.5$ e κ variando.	21
2.18	Função distribuição cumulativa da distribuição κ - μ com $\kappa = 1$. Destaque para a coincidência com a distribuição de Rice.	22
2.19	Função distribuição cumulativa da distribuição κ - μ com $\mu = 0.5$	22
2.20	Equivalência da Distribuição κ - μ com com outras distribuições.	23
2.21	Função densidade de probabilidade da distribuição α - μ com $\alpha = 1$. Destaque para a coincidência com a distribuição de Weibull.	24
2.22	Função densidade de probabilidade da distribuição α - μ com $\mu = 0.5$. Destaque para a coincidência com a distribuição de Nakagami- m	24
2.23	Função distribuição cumulativa da distribuição α - μ com $\alpha = 1$. Destaque para a coincidência com a distribuição de Weibull.	25

2.24	Função distribuição cumulativa da distribuição $\alpha-\mu$ com $\mu = 0.5$. Destaque para a coincidência com a distribuição de Nakagami- m	25
2.25	Função de autocorrelação da distribuição $\alpha-\mu$	26
2.26	Distribuição $\alpha-\mu$ e três de seus casos particulares.	27
3.1	Foto de satélite da região da Unicamp onde foram realizadas as medidas.	28
3.2	Mapa da região da Unicamp onde foram realizadas as medidas.	29
3.3	Configuração da estação transmissora.	30
3.4	Localização da estação transmissora.	30
3.5	Configuração da estação receptora.	31
4.1	Região onde foram realizadas as campanhas de medição.	34
4.2	Vista parcial da Av. Prof. Atílio Martini (1).	37
4.3	Desvios entre a curva prática e as curvas teóricas.	37
4.4	Desvios entre a curva prática e as curvas teóricas.	38
4.5	Desvios entre a curva prática e as curvas teóricas.	38
4.6	Vista parcial da Av. Prof. Atílio Martini (2).	39
4.7	Desvios entre a curva prática e as curvas teóricas.	40
4.8	Desvios entre a curva prática e as curvas teóricas.	40
4.9	Desvios entre a curva prática e as curvas teóricas.	41
4.10	Rua Dr. Antônio Augusto de Almeida	42
4.11	Desvios entre a curva prática e as curvas teóricas.	42
4.12	Desvios entre a curva prática e as curvas teóricas.	43
4.13	Desvios entre a curva prática e as curvas teóricas.	43
4.14	Desvios entre a curva prática e as curvas teóricas.	44
4.15	Desvios entre a curva prática e as curvas teóricas.	45
4.16	Desvios entre a curva prática e as curvas teóricas.	45
4.17	Desvios entre a curva prática e as curvas teóricas.	46
4.18	Desvios entre a curva prática e as curvas teóricas.	47
4.19	Desvios entre a curva prática e as curvas teóricas.	47
4.20	Desvios entre a curva prática e as curvas teóricas.	48
4.21	Desvios entre a curva prática e as curvas teóricas.	49
4.22	Desvios entre a curva prática e as curvas teóricas.	49
4.23	Rua Luverci Pereira de Souza.	50
4.24	Desvios entre a curva prática e as curvas teóricas.	51
4.25	Desvios entre a curva prática e as curvas teóricas.	51
4.26	Desvios entre a curva prática e as curvas teóricas.	52
4.27	Rua Ruberlei Boareto da Silva.	52

4.28	Desvios entre a curva prática e as curvas teóricas.	53
4.29	Desvios entre a curva prática e as curvas teóricas.	54
4.30	Desvios entre a curva prática e as curvas teóricas.	54
4.31	Desvios entre a curva prática e as curvas teóricas.	55
4.32	Desvios entre a curva prática e as curvas teóricas.	56
4.33	Desvios entre a curva prática e as curvas teóricas.	56
4.34	Rua Dr. Shigeo Mori.	57
4.35	Desvios entre a curva prática e as curvas teóricas.	58
4.36	Desvios entre a curva prática e as curvas teóricas.	58
4.37	Desvios entre a curva prática e as curvas teóricas.	59
A.1	Especificações do Gerador de Sinais usado na estação TX.	68
A.2	Especificações do cabo coaxial usado na estação TX.	69
A.3	Especificações da antena transmissora.	70
A.4	Especificações do amplificador usado na estação TX.	71
B.1	Especificações do cabo ST-18/SMAm/SMAm/48 usado na estação RX.	72
B.2	Especificações do cabo coaxial ST-18/SMAm/SMAm/72 usado na estação RX.	73
B.3	Especificações do LNA.	74
B.4	Especificações do analisador de espectro usado na estação RX.	75

LISTA DE SIGLAS

RF: Rádio frequência

AMPS: Sistema Avançado de Telefonia Móvel

PDF: Função densidade de probabilidade

CDF: Função de distribuição cumulativa

GHz: Giga Herz

dB: Decibell

dBi: Decibel em relação à antena isotrópica

GTD: Teoria Geométrica da Difração

UTP: Teoria Uniforme da difração

FEM: Método dos Elementos Finitos

FDTD: Método das Diferenças Finitas

RMS: Valor quadrático médio ou valor eficaz

FEEC: Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação

LOS: Linha de visada

NLOS: Sem linha de visada

LNA: Amplificador de baixo ruído

GPB: Barramento de interface de propósito geral

USB: Barramento série universal

LISTA DE SÍMBOLOS

$F_R(\cdot)$: Função distribuição cumulativa de uma variável aleatória R

$f_R(\cdot)$: Função densidade de probabilidade uma variável aleatória R

$p(\cdot)$: probabilidade de ocorrer um evento

$E(\cdot)$: Média de uma variável aleatória

$Var(\cdot)$: Variância de uma variável aleatória

σ : Desvio padrão

R : Amplitude ou envoltória do sinal recebido

P : Envoltória normalizada do sinal

\hat{r} : Valor RMS de R

ρ : Valores da envoltória do sinal

X : Componente em fase do sinal

Y : Componente em quadratura do sinal

k : Fator de desvanecimento de Rice

m : Fator de desvanecimento de Nakagami

$Q(\cdot, \cdot)$: Função Marcum-Q

$\gamma(\cdot)$: Função Gamma

$A_R(\cdot)$: Função de autocorrelação

${}_2F_1(\cdot, \cdot; \cdot; \cdot)$: Função hipergeométrica de Gauss

α_w : Parâmetro de desvanecimento de Weibull.

d : Distância percorrida

λ : Comprimento de onda

$J_0(\cdot)$: é a função de Bessel de primeiro tipo e ordem zero

κ e μ : Parâmetros de desvanecimento da distribuição κ - μ

α e μ : Parâmetros de desvanecimento da distribuição α - μ

$I_\nu(\cdot)$: Função de Bessel modificada de primeiro tipo e ordem ν

1 INTRODUÇÃO

1.1 O CANAL DE COMUNICAÇÃO SEM FIO E A SUA MODELAGEM MATEMÁTICA

Em enlaces fixos de rádio frequência (RF), em que as antenas ocupam posições definidas em projetos, normalmente as condições de propagação do sinal de RF variam dentro de uma margem que pode ser prevista com elevada confiabilidade. Já nos enlaces de rádio móvel terrestre os projetistas precisam equacionar um número muito maior de variáveis devido à ocorrência de situações que vão desde a visada direta até a obstrução total do sinal por edificações, acidentes geográficos, vegetação, veículos e outros agentes. Consequência disso, no caminho entre o transmissor e o receptor (canal de propagação), o sinal de RF estará sujeito a diversos tipos de fenômenos ondulatórios, tais como reflexões, difrações, espalhamentos, absorções e interferências. Além disso, ainda há que se preocupar com a variação da frequência, por efeito Doppler, devido ao deslocamento do receptor.

Apesar de toda complexidade do ambiente físico existente entre transmissores e receptores, é necessário que esses canais de comunicação sem fio sejam modelados matematicamente de modo que se tenha uma ferramenta para estudo, compreensão, planejamento e simulação de sistemas de comunicação. Essas descrições matemáticas do canal de propagação sem fio devem sempre buscar a conciliação entre a simplicidade e a precisão, sendo que o grau de simplificação vai depender do fim a que se destina.

Desde o início da década de 1980, quando entrou em operação comercial o sistema AMPS, os sistemas de comunicações móveis evoluíram rapidamente de sistemas analógicos, trafegando apenas voz, para sistemas digitais com capacidade para também transmitir dados e vídeo. Como os sistemas evoluíram, as ferramentas para modelagem de canais tiveram também que evoluir, pois a gama de ambientes onde os sistemas móveis operam aumentou grandemente. Inicialmente os sistemas buscavam cobrir grandes áreas transmitindo potências elevadas a partir de antenas localizadas acima dos prédios e outros obstáculos. Com o passar do tempo o foco passou a se concentrar em transmissores menos potentes com antenas mais baixas, distribuídos em células cada vez menores, de modo a atender todo tipo de ambiente de propagação. Isso exigiu o aperfeiçoamento dos modelos de propagação de modo a contemplar os novos ambientes que foram surgindo. Novos modelos matemáticos requerem novos estudos, novas medidas e novas validações para que possam descrever adequadamente os ambientes a que se destinam.

1.2 A IMPORTÂNCIA DAS MEDIDAS FEITAS EM CAMPO E A SUA OBTENÇÃO

Este trabalho tem como base um conjunto de medidas realizadas em campo a partir das quais são analisadas e validadas várias distribuições que procuram descrever diversos ambientes de propagação de RF. Em engenharia os dados levantados no campo e as simulações com eles realizadas são fundamentais para que se possa compreender os mecanismos segundo os quais a natureza se comporta. Para isso é necessário que as medidas sejam planejadas de maneira que realmente sirvam para os propósitos a que se destinam. É fundamental saber o que medir, onde medir e quantas vezes medir. No nosso caso, em que o objetivo é investigar estatísticas de desvanecimento em pequena escala, é muito importante termos um número elevado de amostras do sinal no canal de propagação, o que está contemplado no conjunto de medidas utilizado. Depois de coletadas as amostras é necessário que elas sejam submetidas a tratamento adequado para que possam adquirir formatos apropriados para serem trabalhadas por ferramentas computacionais. Todas essas premissas foram observadas na coleta e preparação das amostras de RF utilizadas neste trabalho.

1.3 OBJETIVO DA DISSERTAÇÃO

O principal objetivo desta dissertação é comparar a aproximação das curvas teóricas da função densidade de probabilidade (PDF, do inglês *probability density function*), da função de distribuição cumulativa (CDF, do inglês *cumulative distribution function*) e da função de autocorrelação das distribuições (a) tradicionais: Rayleigh, Rice, Nakagami- m e Weibull, e (b) generalizadas: α - μ e κ - μ , calculadas com os parâmetros de desvanecimento experimentais, com as curvas empíricas das mesmas métricas. Essa comparação será feita também de forma quantitativa através do cálculo dos desvios entre as curvas teóricas e experimentais. Uma contribuição inédita deste trabalho é a investigação de tais distribuições com a utilização da frequência de 5,5 GHz.

1.4 A ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos e dois apêndices, conforme segue:

- Capítulo 2 - MODELAGEM ESTATÍSTICA DO CANAL RÁDIO-MÓVEL

Neste capítulo discorremos de forma sucinta sobre modelos de propagação, com ênfase aos modelos estatísticos que contemplam a natureza aleatória da canal rádio-móvel. Abordamos os modelos que são objeto deste trabalho, (a) distribuições tradicionais: Rayleigh, Rice, Nakagami- m e Weibull, e (b) distribuições generalizadas: α - μ e κ - μ .

- Capítulo 3 - DESCRIÇÃO DAS MEDIDAS DE CAMPO

Este trabalho se baseia em medidas realizadas em campo. Neste capítulo descrevemos onde e como esses dados foram obtidos e processados.

- Capítulo 4 - RESULTADOS

Apresentamos e comentamos neste capítulo os resultados do processamento dos dados disponíveis, calculando os parâmetros de desvanecimento em cada trajeto e levantando os gráficos da PDF, CDF e Autocorrelação em suas formas teóricas e empíricas. Nos gráficos mostramos os desvios de cada distribuição tratada em relação à curva empírica correspondente. Nos próprios gráficos são apresentados os valores numéricos dos desvios.

- Capítulo 5 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste capítulo são apresentadas as últimas considerações sobre a matéria tratada e apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

- APÊNDICE A - ESPECIFICAÇÕES DA ESTAÇÃO TRANSMISSORA

As especificações dos equipamentos, cabos e antena utilizados na estação transmissora são apresentadas neste apêndice.

- APÊNDICE B - ESPECIFICAÇÕES DA ESTAÇÃO RECEPTORA

Apresentamos neste apêndice as especificações dos equipamentos, cabos e antena utilizados na estação móvel receptora.

2 MODELAGEM ESTATÍSTICA DO CANAL RÁDIO-MÓVEL

O nível do sinal recebido em um enlace de rádio depende, basicamente, de dois tipos de fenômenos, a perda de percurso e o desvanecimento. A perda de percurso é a atenuação sofrida pelo sinal de RF devido à distância entre transmissor e receptor e devido também às difrações e refrações causadas por obstruções existente na trajetória do sinal. Já o desvanecimento vamos analisar na sequência.

2.1 O DESVANECIMENTO

O canal de propagação de um sinal de RF, entre dois pontos, tem suas características variando continuamente no tempo, de tal forma que, no destino, o nível do sinal recebido também varia no tempo, mesmo que, no emissor, a potência transmitida permaneça constante. Esse comportamento é conhecido por desvanecimento e deve ser considerado com muito cuidado nos projetos de sistemas de radiocomunicação, em que é de vital importância o uso de ferramentas que possibilitem prever os seus efeitos.

2.1.1 Classificações do Desvanecimento

Uma das formas de se classificar o desvanecimento está relacionada com o seu comportamento em função da frequência do sinal. Nesse sentido, o desvanecimento pode ser classificado como (a) seletivo e (b) não-seletivo. No desvanecimento seletivo o fenômeno se manifesta apenas em algumas frequências ou faixas de frequências que formam o sinal de RF. Quando toda a faixa de frequências ocupada pelo sinal de RF é afetada de maneira semelhante temos o desvanecimento não-seletivo ou plano. Também podemos classificar o desvanecimento em relação à variação do sinal recebido ao longo do tempo, como (a) em larga escala e (b) em pequena escala.

2.1.1.1 Desvanecimento em larga escala

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

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

2.1.1.2 Desvanecimento em pequena escala

Também conhecido como desvanecimento de curto prazo descreve as variações do nível do sinal de RF que ocorrem a curtas distâncias do transmissor (da ordem de poucos comprimentos de onda) ou em pequenos intervalos de tempo, devido à recepção concomitante de diversas versões do sinal de RF apresentando amplitudes e fases diferentes. Esse fenômeno acontece devido aos multipercursos descritos pelo sinal de RF, que na recepção produzem o fenômeno da interferência, construtiva ou destrutiva. Atenuações rápidas da ordem de 50 dB são comuns nessa situação e podem durar curtos períodos, desde frações de segundo até minutos.

A Figura 2.1 [1, Fig. 3.35] mostra claramente os comportamentos da perda de percurso e dos desvanecimentos em larga escala e em pequena escala.

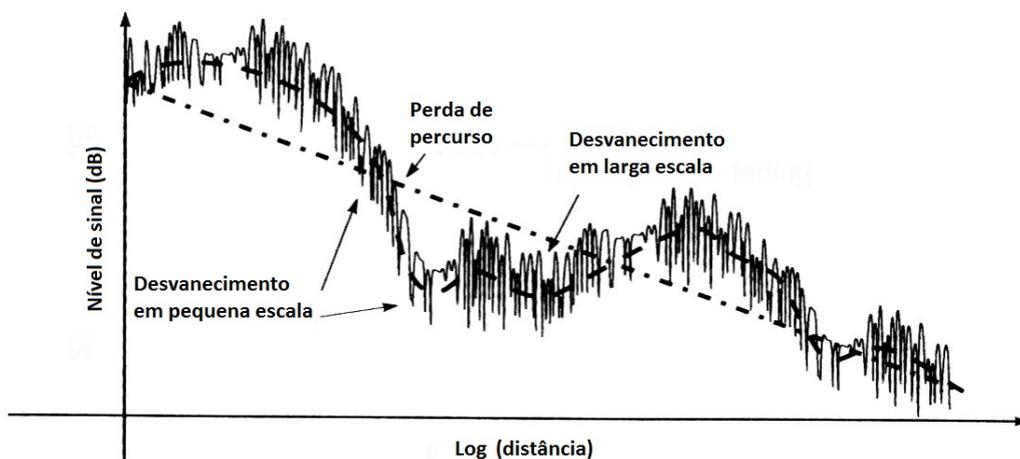


Figura 2.1: Sinal de RF na recepção, submetido a múltiplos fatores de atenuação.

Uma das principais características do desvanecimento em pequena escala é o fenômeno dos múltiplos percursos que se caracteriza pela soma vetorial de diversas amostras do mesmo sinal no receptor com diferentes amplitudes, fases e atrasos, devido a terem percorrido diferentes caminhos entre o transmissor e receptor.

Outro fator que contribui para o desvanecimento em pequena escala é o efeito Doppler

que se manifesta, em sistemas de comunicações móveis, devido ao deslocamento do receptor em relação ao transmissor, ocorrendo uma variação da frequência do sinal recebido. Essa variação pode ser um acréscimo ou um decréscimo na frequência, caso haja uma aproximação ou um distanciamento entre eles, respectivamente. A variação de frequência pode ser calculada através da seguinte expressão:

$$f_D = \frac{v}{\lambda} \cos \theta, \quad (2.1)$$

em que λ é o comprimento de onda do sinal afetado e θ é o ângulo entre a direção de deslocamento do receptor e a frente de onda recebida (ângulo de chegada).

2.2 MODELOS DE PROPAGAÇÃO

A estimativa do nível de um sinal recebido em determinado ponto pode ser feita através de modelos matemáticos. Na prática, os modelos são aproximações que procuram descrever os complexos fenômenos que caracterizam a rádio-propagação. Esses modelos, chamados de modelos de propagação, podem ser classificados da seguinte forma:

1. Modelos empíricos;
2. Modelos determinísticos;
3. Modelos estatísticos.

Modelos empíricos: Os modelos de propagação empíricos são aqueles desenvolvidos com base em campanhas de medições e que resultam em gráficos ou expressões matemáticas que permitem fazer previsões a respeito da atenuação do sinal de RF, em uma interligação, sob determinadas condições. Esses modelos são fortemente dependentes dos ambientes para os quais foram desenvolvidos e devem ser adaptados quando aplicados em ambientes diferentes. Como casos clássicos de modelos empíricos podemos citar os modelos de Okumura [2] baseado em medições na área de Tóquio e Hata [3], que transformou os ábacos de Okumura em uma formulação empírica. Modelos empíricos, quando representados por expressões matemáticas, se caracterizam por serem de fácil implementação computacional, exigindo poucos recursos de processamento.

Modelos determinísticos: São modelos teóricos que se valem das leis do eletromagnetismo para estimar o nível de recepção de um sinal de RF. Nesse sentido são utilizadas como ferramentas, entre outras, a GTD (*Geometrical Theory of Diffraction* ou Teoria Geométrica da Difração), a UTD (*Uniform Theory of Diffraction* ou Teoria Uniforme da Difração), o FEM (*Finite Element Method* ou Método dos Elementos Finitos) e o FDTD (*Finite-Difference Time-Domain* ou Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo). Devem

ser aplicados quando o processo não tem componentes aleatórias e é possível determinar o seu comportamento em qualquer instante do tempo. As maiores dificuldades na aplicação desses modelos ocorrem por conta do elevado consumo de recursos computacionais.

Modelos Estatísticos: São os modelos que tratam os fenômenos que ocorrem na propagação de sinais de RF aleatoriamente e se manifestam com uma determinada probabilidade. Isso permite a abertura de uma poderosa caixa de ferramentas estatísticas através das quais esses fenômenos são analisados e resultados precisos são obtidos. Os fenômenos do sombreamento e do multipercurso são normalmente tratados estatisticamente [1]. Este trabalho investiga a utilidade e o grau de precisão de modelos estatísticos.

2.3 MODELAGEM ESTATÍSTICA

A estimativa do desempenho de um canal rádio-móvel pode ser feita por meio da modelagem estatística do ambiente de propagação. Os modelos estatísticos são baseados em funções de distribuição de probabilidade e os parâmetros de cada distribuição devem ajustar-se ao ambiente a que se destinam.

Numa abordagem estatística, a variável aleatória considerada no receptor é a amplitude do sinal recebido, ou envoltória, designada, por exemplo, por R . Essa amplitude também pode ser tratada em dB, ou seja, $10\log(R)$. Logo essa variável aleatória só poderá assumir valores positivos. Na modelagem estatística se busca determinar a distribuição de probabilidade da variável aleatória que pode ser a envoltória.

Uma ferramenta poderosa e amplamente utilizada na modelagem estatística, é função distribuição de probabilidades que representa a probabilidade de uma variável aleatória R assumir valores iguais ou inferiores a um determinado valor r [4]. A notação usual dessa função é a seguinte

$$F_R(r) = p(R \leq r). \quad (2.2)$$

Outra ferramenta importante no tratamento estatístico do canal de rádio móvel é a função densidade de probabilidade, que, por definição, representa a derivada da função distribuição de probabilidades [4], ou seja,

$$f_R(r) = \frac{d}{dR} F_R(r). \quad (2.3)$$

Consequentemente podemos escrever que

$$F_R(r) = p(R \leq r) = \int_{-\infty}^r f_R(r) dr. \quad (2.4)$$

Dentre as propriedades da PDF podemos destacar

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f_R(r)dr = 1 \quad (2.5)$$

e

$$p(r_1 \leq R \leq r_2) = \int_{r_1}^{r_2} f_R(r)dr. \quad (2.6)$$

A Figura 2.2 mostra a interessante relação entre a PDF e a CDF. Na figura, um valor $P = p[X \leq x]$, que representa a probabilidade de uma variável aleatória X ser menor ou igual a um dado valor x . Também podemos observar, na figura, que P representa uma área sob a curva da PDF e um ponto na curva da CDF.

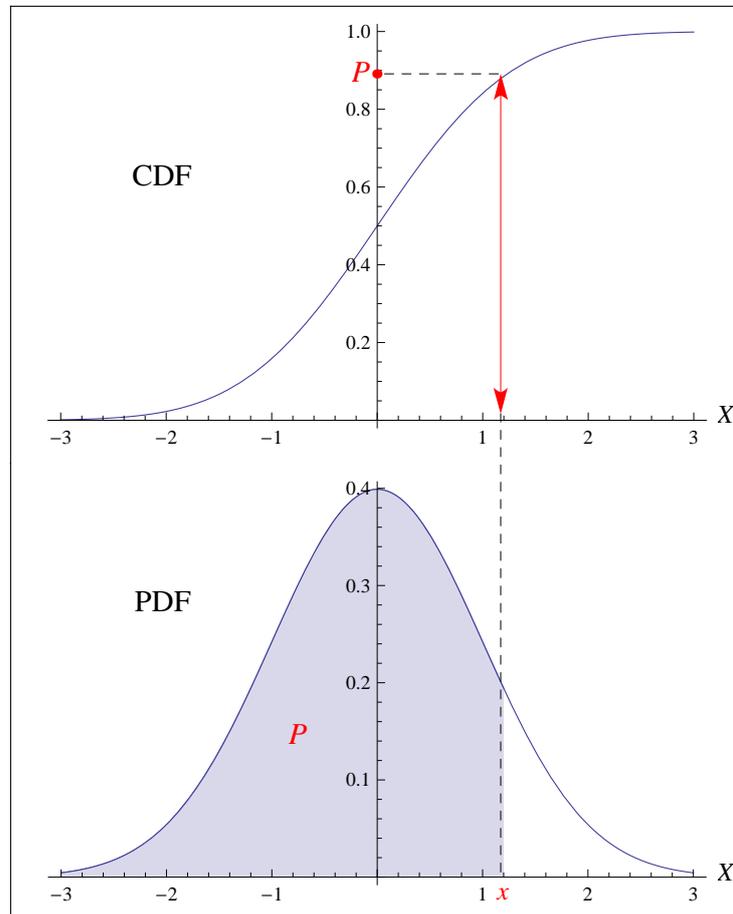


Figura 2.2: Relação entre a PDF e a CDF de uma população.

Outras grandezas importantes no estudo da modelagem estatística do sinal de rádio móvel são:

- Média: Valor mais provável que uma variável aleatório pode assumir e que pode ser

representada pela seguinte expressão [4]

$$E(R) = \bar{R} = \int_{-\infty}^{+\infty} r f_R(r) dr. \quad (2.7)$$

- Variância: Medida de dispersão de uma variável aleatória em torno de sua média, e que pode ser representada pela seguinte expressão [4]

$$Var = \sigma^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (r - \bar{r})^2 f_R(r) dr. \quad (2.8)$$

- Desvio padrão: Outra medida de dispersão de uma variável aleatória em torno de sua média, e que pode ser representada pela raiz quadrada da variância

$$\sigma = \sqrt{Var}. \quad (2.9)$$

Média, variância, desvio padrão, PDF e CDF são conhecidas como estatísticas de primeira ordem [5] e [6]. Outra estatística útil, conhecida como de segunda ordem, a autocorrelação também é tratada nesta dissertação. A partir da autocorrelação pode-se obter importantes parâmetros tais como largura de banda de coerência, tempo médio de desvanecimento, taxa de cruzamento de nível, entre outros [7].

2.4 DISTRIBUIÇÕES DA ENVOLTÓRIA DO SINAL

O canal rádio-móvel é, por natureza, um ambiente extremamente complexo e hostil à passagem do sinal de RF. Em função disso, e pela natureza aleatória dos fenômenos ondulatórios envolvidos, normalmente, a sua modelagem matemática é feita com o auxílio de ferramentas estatísticas, de acordo com as características do desvanecimento enfrentado pelo sinal de RF. Assim, inúmeras distribuições de probabilidade têm sido desenvolvidas e utilizadas para prever o comportamento do sinal.

Para o desvanecimento de longo prazo a distribuição Log-normal tem sido utilizada satisfatoriamente [8]. Já para o desvanecimento de curto prazo, que é objeto deste trabalho, podemos classificar dois tipos de distribuições: as distribuições tradicionais e as distribuições generalizadas.

Dentre as distribuições tradicionais podemos citar as distribuições de Rayleigh [9], de Rice [10], de Nakagami- m [11] e de Weibull [12]. Como distribuições generalizadas citamos κ - μ [8], α - μ [13] e η - μ [8].

2.4.1 Distribuições Tradicionais

2.4.1.1 Distribuição de Rayleigh

A distribuição Rayleigh leva o título de seu idealizador, o inglês Sir John William Strutt, 3º Duque de Rayleigh, que dividiu o Prêmio Nobel de Física de 1904 com Sir William Ramsay, por estudos com gases e a descoberta do argônio. Essa distribuição, proposta inicialmente para utilização com eletromagnetismo foi posteriormente destacada por Pawsey [14], em 1935, no tratamento de dados de potência de sinais de rádio.

Fisicamente, a distribuição de Rayleigh se ajusta a ambientes de propagação homogêneos, com elevado número de ondas originadas de multi-percursos e sem linha de visada (NLOS, do inglês *Non-line-of-sight*). As inúmeras componentes de multi-percursos têm fases distribuídas entre 0 e 2π , amplitudes mutuamente independentes e sem destaque para nenhuma delas. Nesse ambiente, a envoltória R do sinal recebido pode ser expresso em função de suas componentes em fase e quadratura como [5]

$$R = \sqrt{X^2 + Y^2}, \quad (2.10)$$

em que X e Y são processos gaussianos independentes com média nula $E(X) = E(Y) = 0$ e variâncias iguais $E(X^2) = E(Y^2) = \sigma^2$.

A PDF da distribuição de Rayleigh é dada por [1]

$$f_R(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right), \quad r \geq 0. \quad (2.11)$$

Se considerarmos a envoltória normalizada $P = R/\hat{r}$, em que $\hat{r} = \sqrt{E(R^2)}$ é o valor *rms* de R , a função densidade de probabilidade (PDF) do envelope da distribuição de Rayleigh pode ser escrita como

$$f_P(\rho) = 2\rho \exp(-\rho^2). \quad (2.12)$$

Essa função, bastante simples, é escrita em função de um parâmetro de desvanecimento e apresenta, geralmente, bons resultados quando aplicada a dados experimentais.

A função distribuição acumulada da distribuição de Rayleigh é dada por [1]

$$F_R(r) = 1 - \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right), \quad r \geq 0. \quad (2.13)$$

Para o caso de envoltória normalizada, a CDF da distribuição de Rayleigh pode ser obtida utilizando-se a definição de CDF que diz que a CDF é igual à integral da PDF. Então,

integrando a PDF teremos

$$F_P(\rho) = \int 2\rho \exp(-\rho^2) d\rho, \quad (2.14)$$

ou seja,

$$F_P(\rho) = 1 - e^{-\rho^2}. \quad (2.15)$$

A Figura 2.3 mostra as curvas da PDF e da CDF da distribuição de Rayleigh.

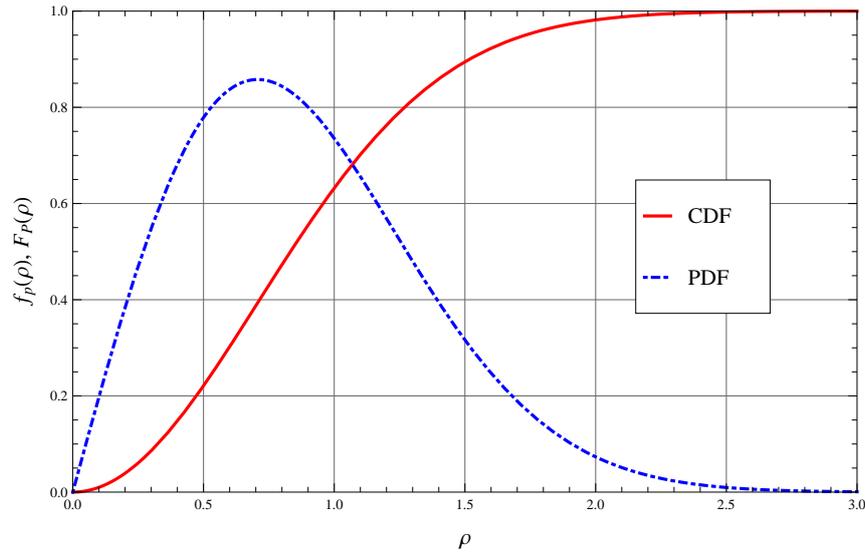


Figura 2.3: Curvas da PDF e da CDF da distribuição Rayleigh.

A Figura 2.4 mostra que a Distribuição de Rayleigh pode ser caso particular de várias outras distribuições de probabilidade, bastando, para isso, configurar adequadamente os seus parâmetros.

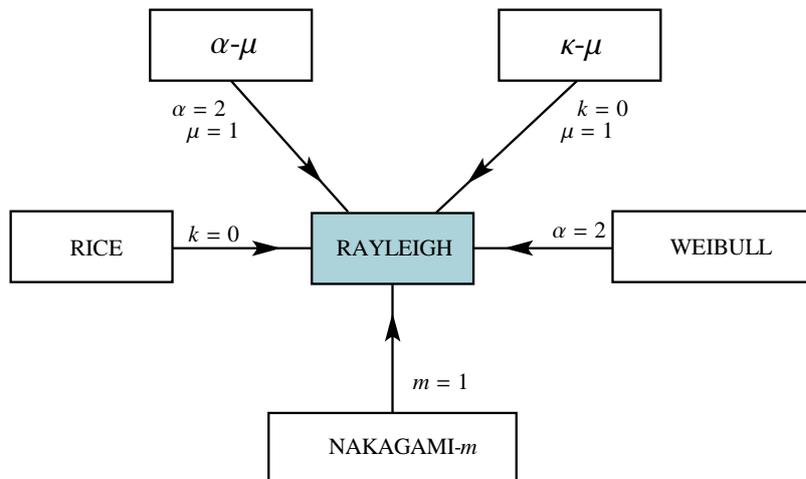


Figura 2.4: Distribuição Rayleigh como caso particular de outras distribuições.

2.4.1.2 Distribuição de Rice

A distribuição de Rice [10], proposta por Stephen O. Rice, na década de 1940, destinava-se, inicialmente, a estudos de ruído em sistemas FM e análise de sinais de rádio. Essa distribuição se ajusta a ambientes onde, além das componentes de multi-percurso, tem-se um sinal direto, com potência superior, devido à existência de visada direta entre transmissor e receptor (LOS, do inglês *line-of-sight*). Dentre as distribuições tradicionais é a única que faz tal consideração. A distribuição de Rice inclui a distribuição de Rayleigh, como caso especial, quando não ocorre o raio direto.

No ambiente Rice, a envoltória R do sinal recebido pode ser expresso em função de suas componentes em fase (X) e quadratura (Y) como [10]

$$R = \sqrt{(X + p)^2 + (Y + q)^2}, \quad (2.16)$$

em que X e Y são processos gaussianos mutuamente independentes, com média nula $E(X) = E(Y) = 0$ e variâncias iguais $E(X^2) = E(Y^2) = \sigma^2$. As variáveis p e q representam os valores médios das componentes em fase e quadratura das ondas de multipercurso.

Considerando-se a envoltória normalizada $P = R/\hat{r}$, em que $\hat{r} = \sqrt{E(R^2)}$ é o valor *rms* de R , a função densidade de probabilidade do envelope da distribuição de Rice pode ser escrita como [10]

$$f_P(\rho) = (1 + k)e^{-k} 2\rho e^{-(1+k)\rho^2} I_0 \left[2\rho\sqrt{k(1+k)} \right], \quad (2.17)$$

em que $k = \frac{\sqrt{m^2 - m}}{m - \sqrt{m^2 - m}}$, $m = \frac{1}{\text{Var}(\rho^2)}$ e $I_0(\cdot)$ é a função de Bessel modificada de primeira classe e ordem zero. O parâmetro k , chamado de fator de Rice, representa a relação entre a potência da componente dominante e a potência das componentes originadas por multipercurso. Para pequenos valores de k , o que ocorre quando a potência da componente direta é pouco significativa em relação às componentes de multi-percurso, a distribuição de Rice tende à distribuição de Rayleigh. Valores elevados de k representam a situação em que a potência da componente direta é muito maior que as de multipercurso e nesse caso a distribuição de Rice tende a uma distribuição Gaussiana.

A Figura 2.5 apresenta as curvas da PDF da distribuição de Rice para diferentes valores de k .

A função distribuição acumulada da distribuição de Rice, na sua forma normalizada, é dada por [15]

$$F_P(\rho) = 1 - Q_1(\sqrt{2k}, \sqrt{2(1+k)}\rho), \quad (2.18)$$

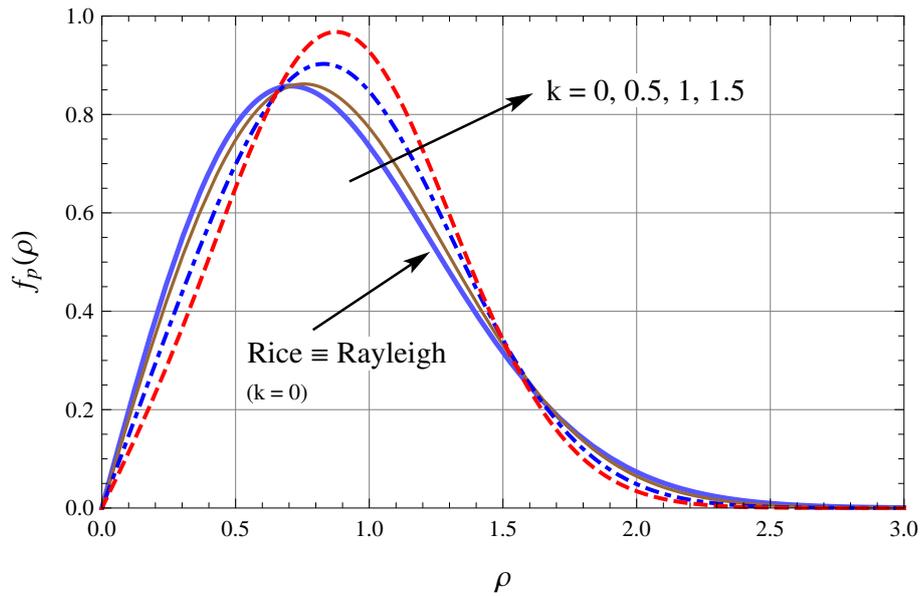


Figura 2.5: Função densidade de probabilidade da distribuição Rice.

em que $Q_\nu(\cdot, \cdot)$ representa a função Marcum-Q [16]

$$Q_\nu(a, b) = \frac{1}{a^{\nu-1}} \int_b^\infty x^\nu e^{-\frac{x^2+a^2}{2}} I_{\nu-1}(ax) dx. \quad (2.19)$$

A Figura 2.6 apresenta as curvas da CDF da distribuição de Rice para diferentes valores de k .

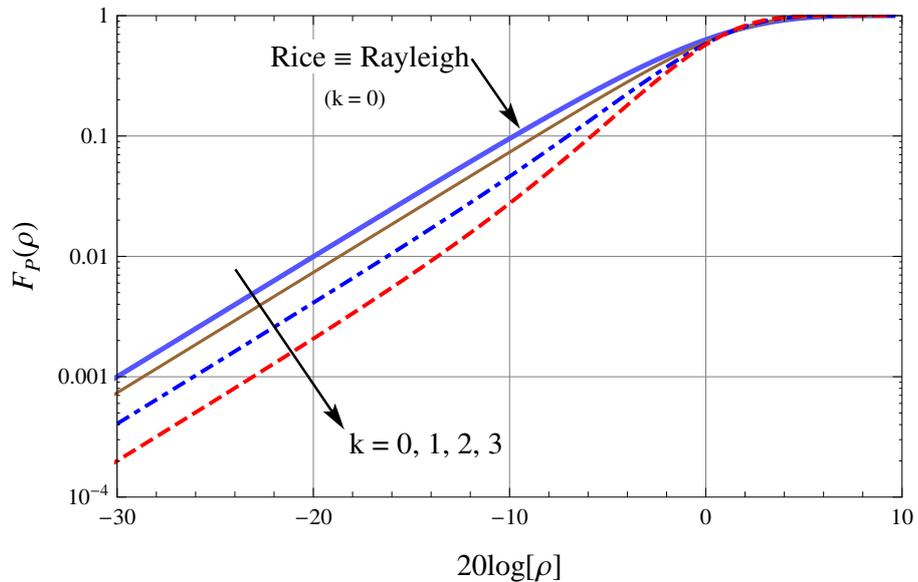


Figura 2.6: Função distribuição de probabilidade da distribuição Rice.

A Figura 2.7 mostra que a Distribuição Rice é caso particular da Distribuição κ - μ e

que, por sua vez tem como caso particular a Distribuição Rayleigh, com a devida adequação dos parâmetros, conforme apresentado na figura.

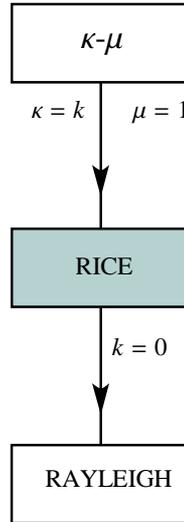


Figura 2.7: Equivalências entre as Distribuições κ - μ , Rice e Rayleigh.

2.4.1.3 Distribuição de Nakagami- m

A distribuição de Nakagami [11], foi apresentada em 1943, baseada em resultados de estudos experimentais sobre desvanecimento rápido em propagação na faixa de HF, realizados por Minoru Nakagami. Essa distribuição, apresentada como m -Distribution, ficou conhecida como distribuição Nakagami- m .

O ambiente apropriado para utilização da distribuição Nakagami- m é um ambiente NLOS, em que o sinal recebido é formado pela combinação de diversos *clusters*, em que as componentes apresentam atrasos de propagação similares e fases aleatórias. Esse modelo, descrito em [17], pode ser expresso em função de suas componentes em fase (X) e em quadratura (Y) como [17]

$$R = \sqrt{\sum_{i=1}^m (X_i^2 + Y_i^2)}, \quad (2.20)$$

em que X_i e Y_i são processos Gaussianos, mutuamente independentes, com média nula $E(X) = E(Y) = 0$ e igual variância $E(X^2) = E(Y^2) = \sigma^2$. O parâmetro m , conhecido como fator de desvanecimento de Nakagami, representa o número de *clusters* de multipercurso.

Considerando-se a envoltória normalizada $P = R/\hat{r}$, tal que $\hat{r} = \sqrt{E(R^2)}$ é o valor *rms* de R , a função densidade de probabilidade do envelope da distribuição Nakagami- m

pode ser escrita como [18]

$$f_P(\rho) = \frac{2m^m}{\Gamma(m)} \rho^{2m-1} e^{-m\rho^2}, \quad (2.21)$$

sendo que

$$m = \frac{1}{\text{Var}(\rho^2)}, \quad (2.22)$$

e $\Gamma(\cdot)$ e $\text{Var}(\cdot)$ [5, eq. 5-61] representam, respectivamente, a função Gamma e o operador variância.

A distribuição de Rayleigh é um caso particular da distribuição de Nakagami- m para $m=1$.

A Figura 2.8 apresenta as curvas da PDF da distribuição de Nakagami- m para diferentes valores de m .

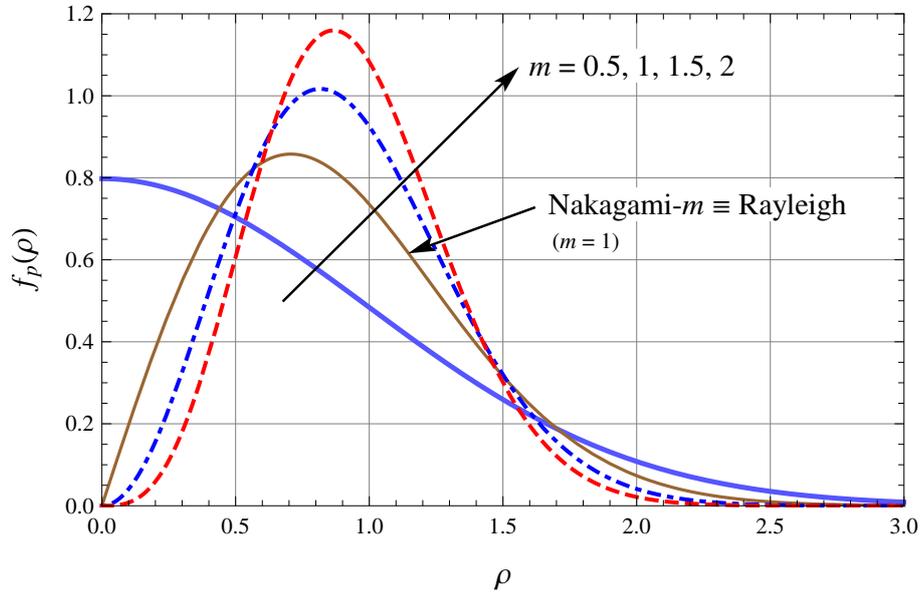


Figura 2.8: Função densidade de probabilidade da distribuição Nakagami- m .

A função distribuição cumulativa da distribuição de Nakagami- m , na sua forma normalizada, é dada por [15]

$$Fp(\rho) = 1 - \frac{\Gamma(m, m\rho^2)}{\Gamma(m)}, \quad (2.23)$$

em que $\Gamma(\cdot, \cdot)$ representa a função Gamma incompleta [19, eq. (6.5.1)].

A Figura 2.9 apresenta as curvas da CDF da distribuição de Nakagami- m para diferentes valores de m .

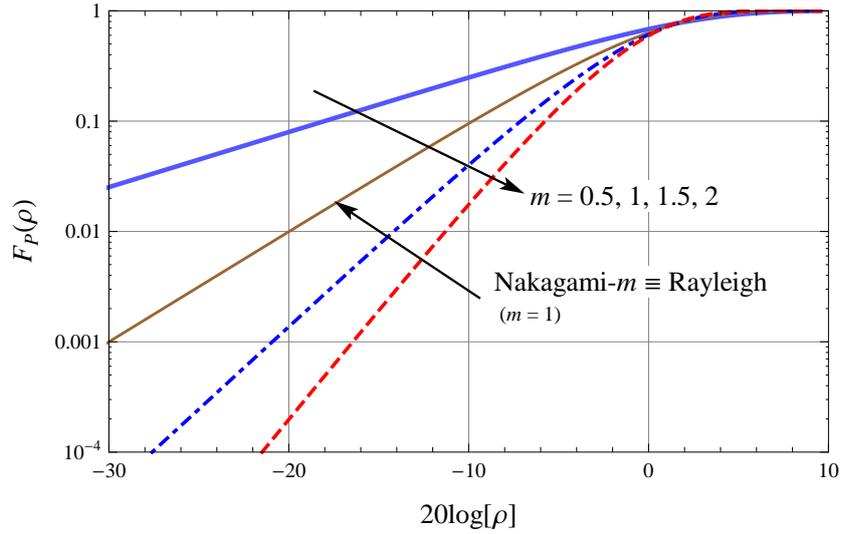


Figura 2.9: Função distribuição cumulativa da distribuição de Nakagami- m .

Outra métrica importante, esta de segunda ordem, é a autocorrelação. A partir dela podem ser obtidos, direta ou indiretamente, outros parâmetros tais como tempo médio de desvanecimento, taxa de cruzamento de nível e duração média de desvanecimento. Para a distribuição Nakagami- m , segundo [7, eq. (2.28)], temos a seguinte expressão para a autocorrelação espacial da envoltória

$$A_R(d) = \frac{\Omega}{m} \frac{\Gamma^2(m + \frac{1}{2})}{\Gamma^2(m)} {}_2F_1 \left[-\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}; m; J_0^2 \left(\frac{2\pi d}{\lambda} \right) \right], \quad (2.24)$$

em que Ω é a potência média, ${}_2F_1(\cdot, \cdot; \cdot; \cdot)$ é a função hipergeométrica de Gauss [19, eq. (15.1.1)] e $J_0(\cdot)$ é a função de Bessel de primeiro grau e ordem zero [20, eq. (8.401)].

A Figura 2.10 apresenta as curvas da autocorrelação da distribuição Nakagami- m para diferentes valores de m .

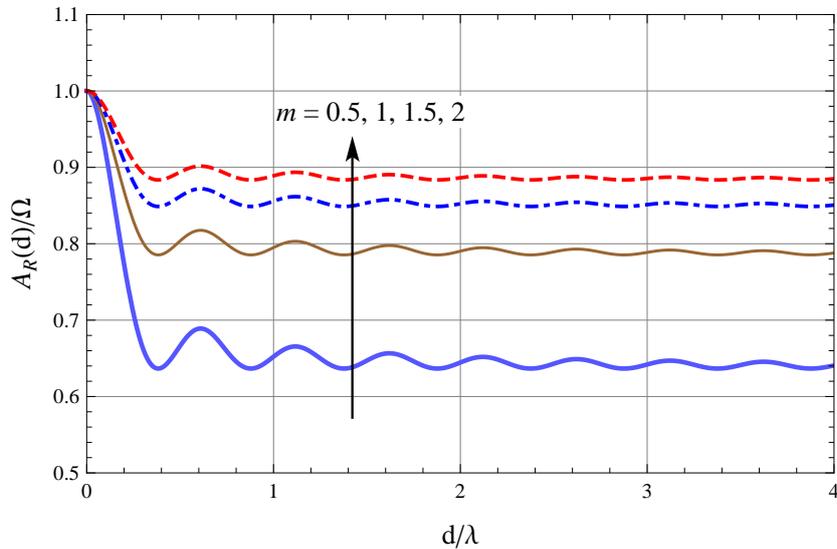


Figura 2.10: Função de autocorrelação da distribuição Nakagami- m .

A figura 2.11 mostra que a Distribuição Nakagami- m pode ser um caso particular das distribuições κ - μ e α - μ e, por sua vez, tem como caso particular a distribuição de Rayleigh através da adequada configuração de seus parâmetros, conforme ilustrado na mesma.

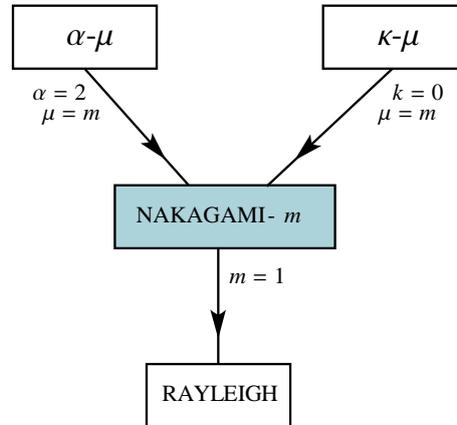


Figura 2.11: Equivalências da distribuição Nakagami- m .

2.4.1.4 Distribuição de Weibull

A distribuição de Weibull leva o nome do engenheiro e cientista sueco Ernst Hjalmar Waloddi Weibull, que ficou conhecido pelos seus trabalhos na área de resistência dos materiais e análise de fadiga. Em sua publicação [12], de 1939, Weibull apresentou um modelo estatístico para análise de confiabilidade de máquinas, baseado em uma distribuição proposta em 1928, por Fisher e Tippett [21], relacionada à teoria de valores extremos (maiores e menores membros de uma amostra).

Apesar ter sido proposta para aplicação na área de resistência dos materiais, a distribuição de Weibull é largamente aplicada em outras áreas da ciência devido à sua flexibilidade e simplicidade. Na área de telecomunicações tem se mostrado útil na descrição de canais com desvanecimento devido a interferência de sinais gerados por multipercurso [22].

Conforme o modelo físico proposto por [12], a envoltória R de um sinal resultante de um processo Weibull é um processo não-linear e segue a forma [7, eq. (2.1)]

$$R^{\alpha_w} = X_i^2 + Y_i^2, \quad (2.25)$$

em que X_i e Y_i são processos Gaussianos, mutuamente independentes, com média nula $E(X_i) = E(Y_i) = 0$ e variâncias iguais $E(X_i^2) = E(Y_i^2) = \hat{r}^{\alpha_w}/2$. O parâmetro α_w , representa a não linearidade do meio de propagação e $E(\cdot)$ a média estatística. O parâmetro \hat{r} representa a raiz α_w -ésima da média estatística de R^{α_w} , ou seja, $\hat{r} = \alpha_w \sqrt[E(R^{\alpha_w})]$.

Partindo-se da equação (2.25) chega-se à PDF da distribuição de Weibull que, para

uma envoltória normalizada $P = R/\hat{r}$, é dada por [7, eq. (2.3)]

$$f_P(\rho) = \alpha_w \rho^{\alpha_w - 1} e^{-\rho^{\alpha_w}}. \quad (2.26)$$

A Figura 2.12 apresenta as curvas da PDF da distribuição Weibull para diferentes valores de α_w .

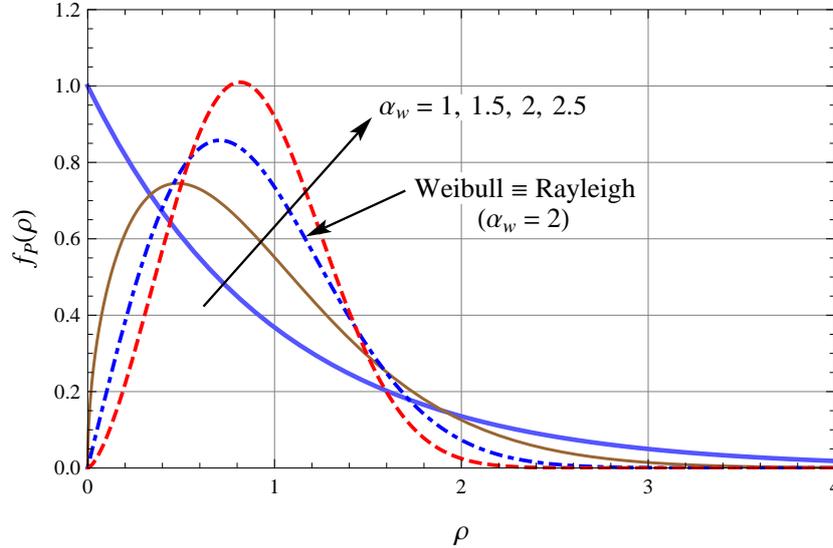


Figura 2.12: Função densidade de probabilidade da distribuição Weibull.

A função distribuição cumulativa da distribuição Weibull, que pode ser obtida por meio da integração da PDF [7], na sua forma normalizada, é dada por [7, eq. (2.5)]

$$F_P(\rho) = 1 - e^{-\rho^{\alpha_w}}. \quad (2.27)$$

A Figura 2.13 apresenta as curvas da CDF da distribuição de Weibull para diferentes valores de α .

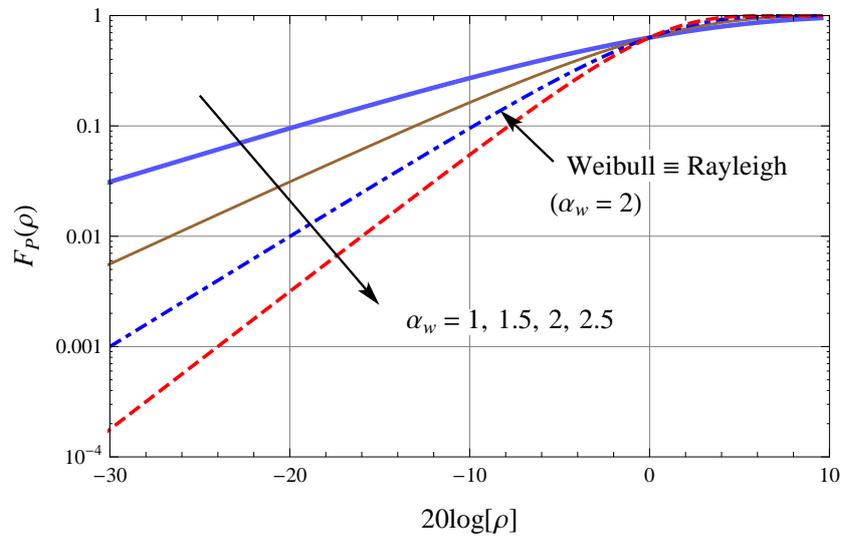


Figura 2.13: Função distribuição cumulativa da distribuição Weibull.

Para a distribuição Weibull, a função de autocorrelação espacial da envoltória pode ser expressa como [7, eq. (2.20)]

$$A_R(d) = \hat{r}^2 \Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{\alpha_w}\right) {}_2F_1 \left[-\frac{1}{\alpha_w}, -\frac{1}{\alpha_w}; 1; J_0^2(2\pi d/\lambda) \right]. \quad (2.28)$$

A Figura 2.14 apresenta as curvas da autocorrelação da distribuição Weibull para alguns valores de α_w .

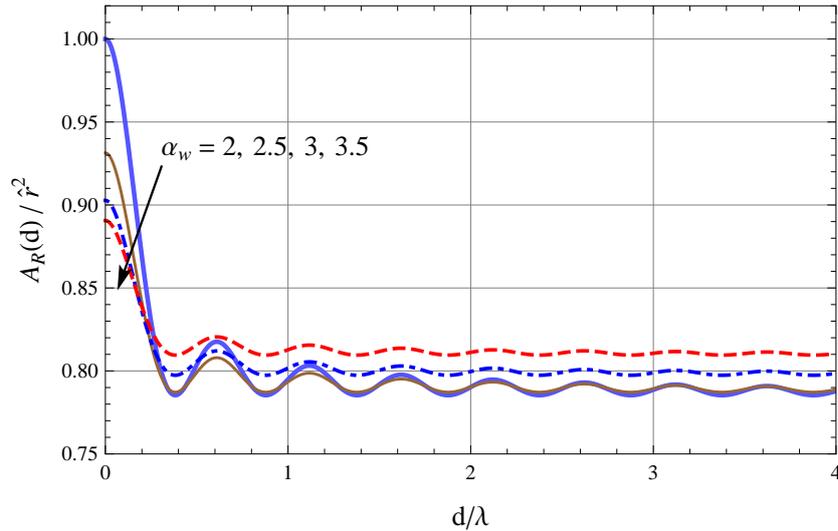


Figura 2.14: Função de autocorrelação da distribuição Weibull.

A Figura 2.15 mostra a distribuição Weibull como caso particular da Distribuição α - μ e que, por sua vez, tem a Distribuição Rayleigh como caso particular.

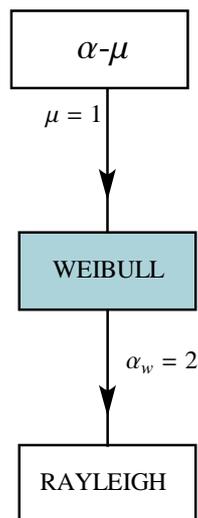


Figura 2.15: Equivalências da Distribuição Weibull.

2.4.2 Distribuições κ - μ e α - μ

As distribuições tradicionais, geralmente, apresentam uma razoável aproximação com os resultados experimentais. Entretanto, como foram definidas a partir aproximações e simplificações relativas ao meio de propagação (ambiente com espalhamento homogêneo, por exemplo) é comum surgirem casos, na prática, em que essas distribuições falhem no ajuste de dados colhidos em campo, devido à caracterização de ambiente não linear. Assim, novas distribuições foram desenvolvidas e propostas nos últimos anos, dentre as quais abordaremos duas neste trabalho: κ - μ e α - μ .

2.4.2.1 Distribuição κ - μ

A distribuição κ - μ , proposta por Michel Daoud Yacoub, em 2007 [8], se aplica a ambientes com linha de visada (LOS). Essa distribuição supõe a contribuição de vários *clusters* na formação do sinal recebido e meio de propagação não homogêneo. As ondas espalhadas de cada *cluster* têm potências idênticas, mas internamente, cada *cluster* tem uma componente dominante, de potência arbitrária. Para esse modelo físico, a envoltória R de um sinal com desvanecimento segue a forma [8, eq. (6)]

$$R^2 = \sum_{i=1}^{\mu} (X_i + p_i)^2 + \sum_{i=1}^{\mu} (Y_i + q_i)^2, \quad (2.29)$$

em que X_i e Y_i são processos Gaussianos, mutuamente independentes, com média nula $E(X_i) = E(Y_i) = 0$ e igual variância $E(X_i^2) = E(Y_i^2) = \sigma^2$. Os parâmetros p_i e q_i representam os valores médios das componentes em fase e quadratura das ondas oriundas de multipercursos de um *cluster* i . A variável μ representa o número de *clusters* de multipercursos.

Considerando-se a envoltória normalizada $P = R/\hat{r}$, em que $\hat{r} = \sqrt{E(R^2)}$ é o valor *rms* de R , a função densidade de probabilidade do envelope da distribuição κ - μ pode ser escrita como [8, eq. (1)]

$$f_P(\rho) = \frac{2\mu(1+\kappa)^{\frac{\mu+1}{2}}}{\kappa^{\frac{\mu-1}{2}} \exp(\mu\kappa)} \rho^\mu \exp[-\mu(1+\kappa)\rho^2] I_{\mu-1} \left[2\mu\sqrt{\kappa(1+\kappa)}\rho \right], \quad (2.30)$$

em que $I_\nu(\cdot)$ é a função de Bessel modificada de primeiro tipo e ordem ν [19, eq. 9.6.20], $\kappa > 0$ é a razão entre a potência total das componentes dominantes e a potência total das ondas espalhadas e $\mu > 0$ é dado por $\mu = \frac{1}{\text{Var}(P^2)} \frac{1+2\kappa}{(1+\kappa)^2}$.

A Figura 2.16 apresenta as curvas da PDF da distribuição κ - μ para $\kappa = 1$ e μ variando. Nessa figura é destacada a coincidência com a distribuição Rice na curva em que $\mu = 1$. Já

a Figura 2.17 mostra as curvas da PDF da distribuição κ - μ para $\mu = 0.5$ e κ variando.

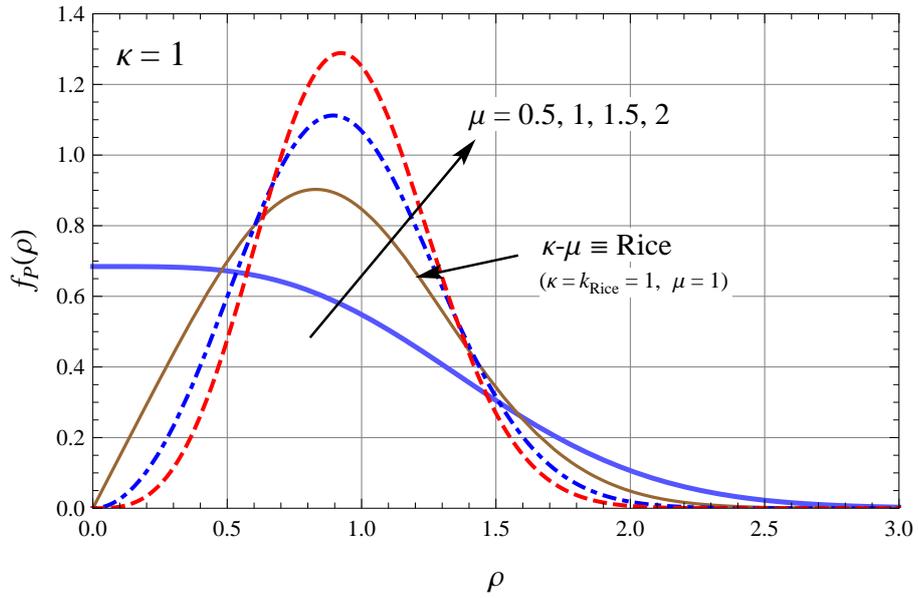


Figura 2.16: Função densidade de probabilidade da distribuição κ - μ com $\kappa = 1$. Destaque para a coincidência com a distribuição Rice.

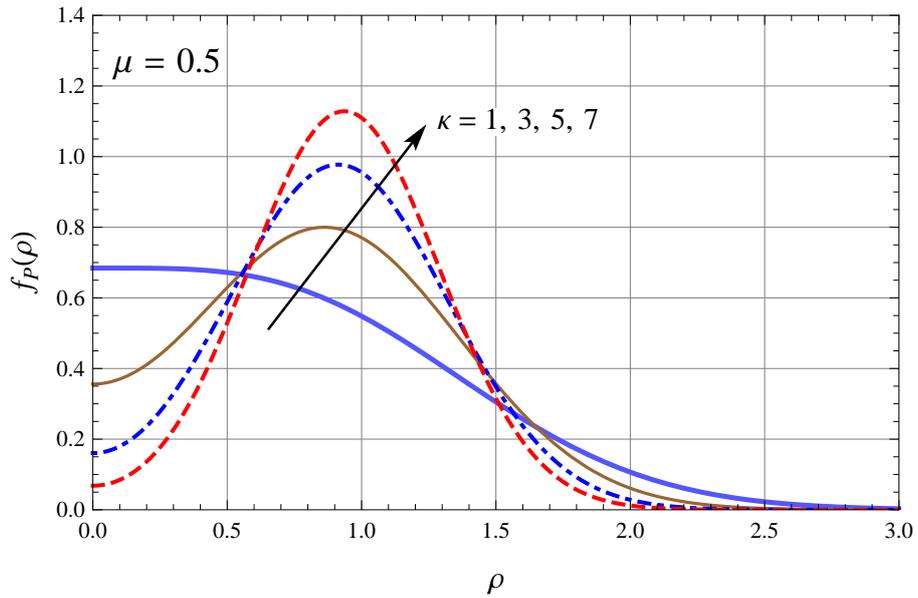


Figura 2.17: Função densidade de probabilidade da distribuição κ - μ com $\mu = 0.5$ e κ variando.

A função distribuição cumulativa da envoltória da distribuição κ - μ , na sua forma normalizada, é dada por [8, eq. (3)]

$$F_P(\rho) = 1 - Q_\mu \left[\sqrt{2\kappa\mu}, \sqrt{2(1+\kappa)\mu\rho} \right], \quad (2.31)$$

em que $Q_\nu(a, b)$ é a função Marcum Q generalizada [16].

As Figuras 2.18 e 2.19 apresentam as curvas da CDF da distribuição κ - μ para $\kappa = 1$

com μ variando, com destaque para a coincidência com a distribuição de Rice na curva com $\mu = 1$, e $\mu = 0.5$ com κ variando, respectivamente.

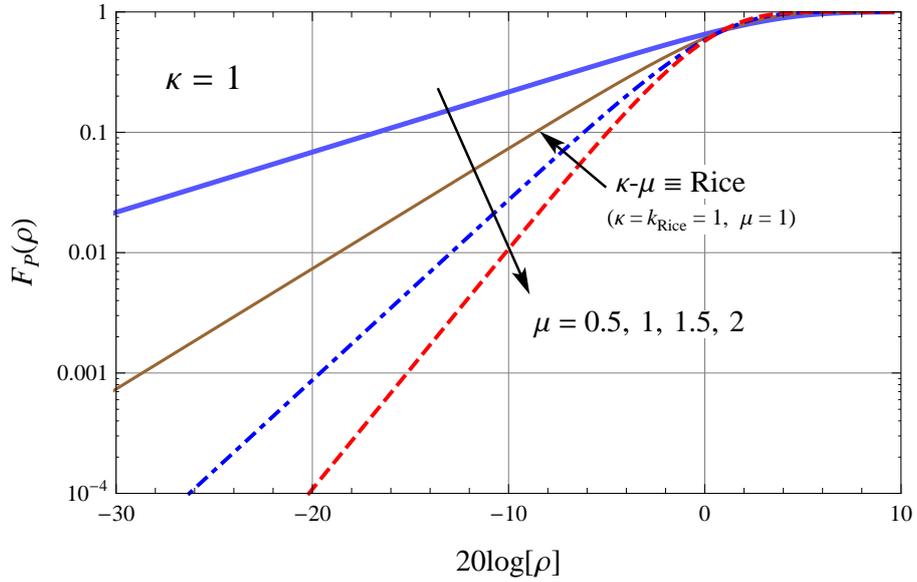


Figura 2.18: Função distribuição cumulativa da distribuição κ - μ com $\kappa = 1$. Destaque para a coincidência com a distribuição de Rice.

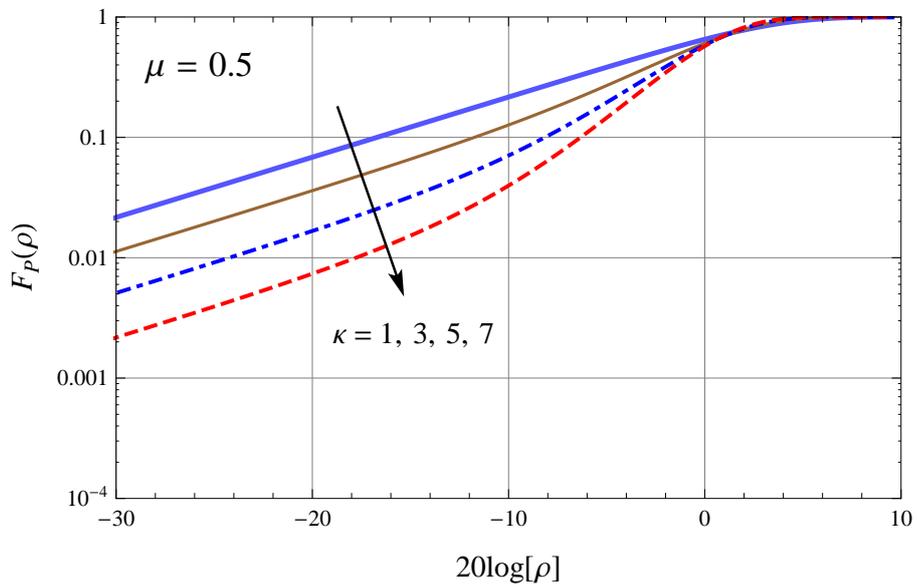


Figura 2.19: Função distribuição cumulativa da distribuição κ - μ com $\mu = 0.5$.

Ainda não foi obtida uma expressão fechada para a auto-correlação da distribuição κ - μ .

A Figura 2.20 mostra que as distribuições Rayleigh, Rice e Nakagami- m são casos particulares da Distribuição κ - μ , para valores específicos de seus parâmetros.

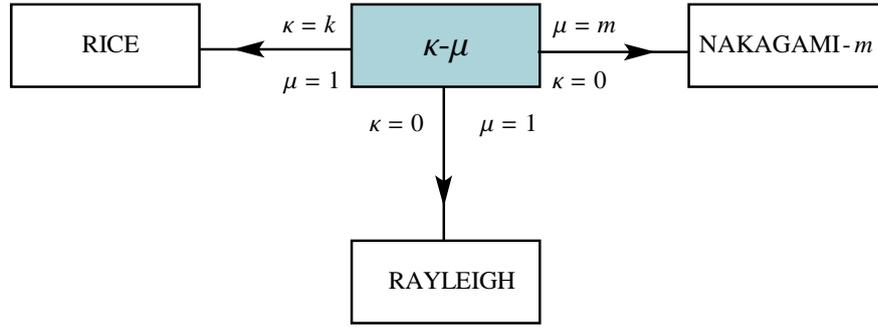


Figura 2.20: Equivalência da Distribuição κ - μ com com outras distribuições.

2.4.2.2 Distribuição α - μ

Essa distribuição, destinada à modelagem de fenômenos de desvanecimento, foi proposta por Michel Daoud Yacoub, em 2007 [23]. Antes disso, em 1962, já havia sido apresentada por Stacy [24] como uma versão generalizada da distribuição Gamma, direcionada à solução de problemas puramente matemáticos.

A distribuição α - μ , cujos parâmetros são associados com propriedades do meio de propagação, é bastante flexível e de tratamento matemático de baixa complexidade. Inclui, entre outras, como casos particulares, as distribuições Rayleigh, Nakagami- m e Weibull, que são de interesse neste trabalho.

Esta distribuição supõe a contribuição de vários *clusters* na formação do sinal recebido com desvanecimento e meio de propagação não homogêneo. As ondas espalhadas de cada *cluster* têm potências idênticas, sem a presença de uma componente dominante, o que caracteriza um ambiente sem linha de visada (NLOS). Em cada *cluster* as fases das ondas espalhadas são aleatórias e os tempos de atraso semelhantes. Entre os *clusters* o atraso ou espalhamento entre as ondas é relativamente grande. Para esse modelo físico, a envoltória R de um sinal com desvanecimento segue a forma [23, eq. (10)]

$$R^\alpha = \sum_{i=1}^{\mu} (X_i^2 + Y_i^2), \quad (2.32)$$

em que X_i e Y_i são processos Gaussianos, mutuamente independentes, com média nula $E(X_i) = E(Y_i) = 0$ e igual variância $E(X_i^2) = E(Y_i^2) = \hat{r}^2/2\mu$. A variável μ representa o número de *clusters* de multipercursos e $\alpha > 0$ representa a não-linearidade do meio.

A partir de (2.32) é possível chegar-se à PDF da distribuição α - μ que, para uma envoltória normalizada $P = R/\hat{r}$, onde $\hat{r} = \sqrt[\alpha]{E(R^\alpha)} = \sqrt[2]{2\mu\sigma^2}$, é dada por [23, eq. (3)]

$$f_{P_A}(\rho) = \frac{\alpha\mu^\mu \rho^{\alpha\mu-1}}{\Gamma(\mu) \exp(\mu\rho^\alpha)}, \quad (2.33)$$

em que $\mu > 0$ representa o inverso da variância de P^α , ou seja $\mu = \frac{1}{\text{Var}(P^\alpha)}$ e $\Gamma(\cdot)$ é a função Gamma [19, eq. (6.1.1)].

As Figuras 2.21 e 2.22 apresentam as curvas da PDF da distribuição α - μ para $\alpha = 1$ com μ variando e para $\mu = 0.5$ com α variando, respectivamente. Nessas figuras são destacadas as relações com outras distribuições.

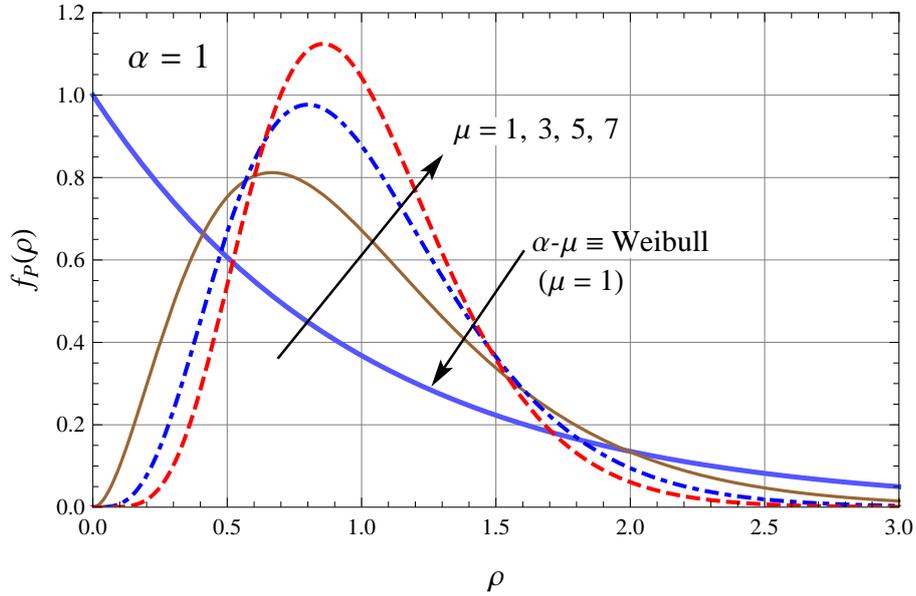


Figura 2.21: Função densidade de probabilidade da distribuição α - μ com $\alpha = 1$. Destaque para a coincidência com a distribuição de Weibull.

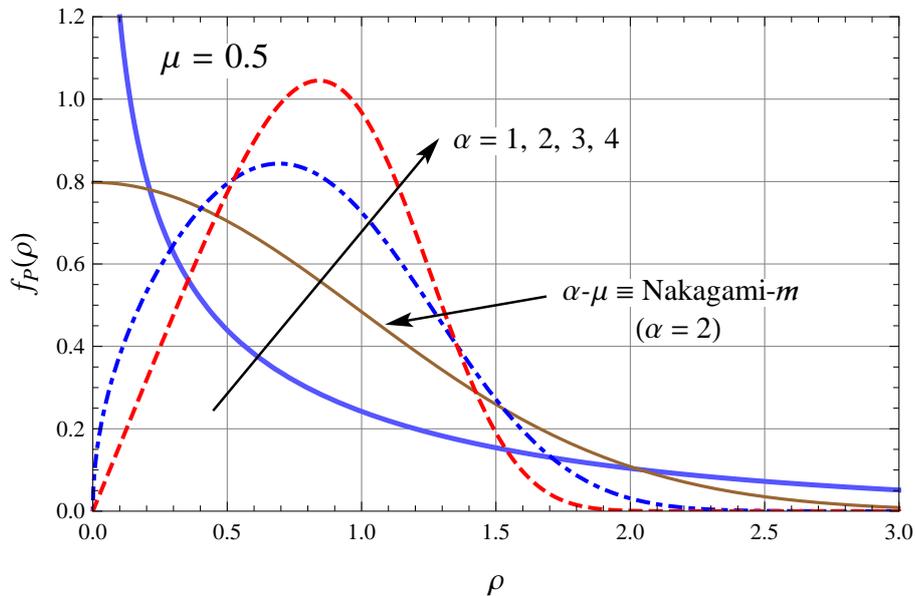


Figura 2.22: Função densidade de probabilidade da distribuição α - μ com $\mu = 0.5$. Destaque para a coincidência com a distribuição de Nakagami- m .

A função distribuição cumulativa (CDF) da envoltória da distribuição α - μ , na sua

forma normalizada, é dada por [23, eq. (9)]

$$F_P(\rho) = 1 - \frac{\Gamma(\mu, \mu\rho^\alpha)}{\Gamma(\mu)}, \quad (2.34)$$

em que $\Gamma(\cdot)$ é a função Gamma [19, eq. (6.1.1)].

As Figuras 2.23 e 2.24 apresentam as curvas da CDF da distribuição α - μ para $\alpha = 1$ com μ variando e $\mu = 0.5$ com α variando, respectivamente. Nessas figuras são destacadas as relações com outras distribuições.

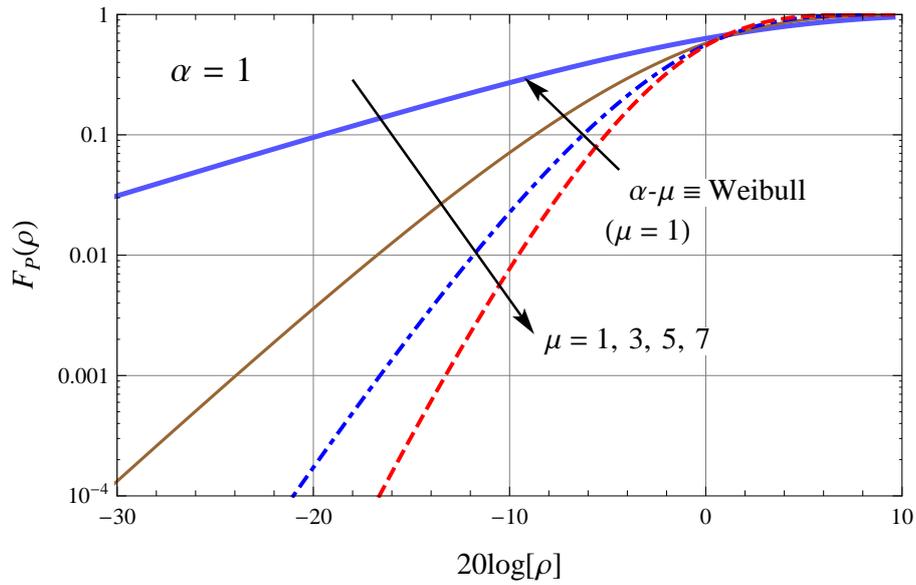


Figura 2.23: Função distribuição cumulativa da distribuição α - μ com $\alpha = 1$. Destaque para a coincidência com a distribuição de Weibull.

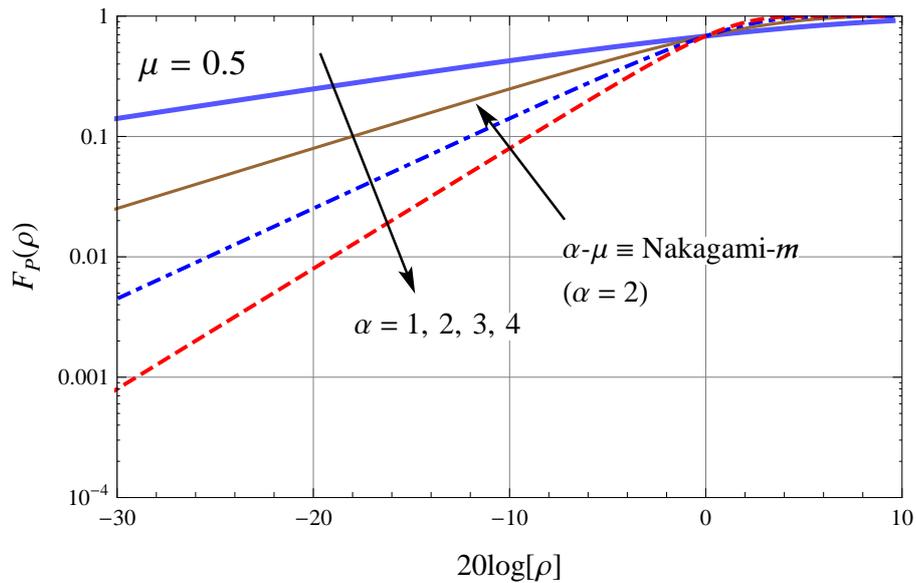


Figura 2.24: Função distribuição cumulativa da distribuição α - μ com $\mu = 0.5$. Destaque para a coincidência com a distribuição de Nakagami- m .

Para a distribuição α - μ , a função de autocorrelação espacial da envoltória pode ser expressa como [25, eq. (2)]

$$A_R(d) = \frac{\hat{r}^2 \Gamma^2(\mu + \frac{1}{\alpha}) {}_2F_1(-\frac{1}{\alpha}, -\frac{1}{\alpha}; \mu; \rho(d))}{\mu^{2/\alpha} \Gamma^2(\mu)}, \quad (2.35)$$

em que $\rho(d)$ representa o coeficiente de autocorrelação espacial, $\Gamma(\cdot)$ é a função Gamma [19, eq. (6.1.1)], ${}_2F_1(\cdot, \cdot; \cdot; \cdot)$ é a função hipergeométrica de Gauss [19, eq. (15.1.1)]. Para um cenário de desvanecimento isotrópico com ângulo uniforme de incidência (AOA) das ondas de multipercursos, $\rho(d) = J_0^2(2\pi d/\lambda)$ [25], em que $J_0(\cdot)$ é a função de Bessel de primeiro tipo e ordem zero.

A Figura 2.25 apresenta as curvas da autocorrelação da distribuição α - μ para $\alpha = 2$ e alguns valores de μ .

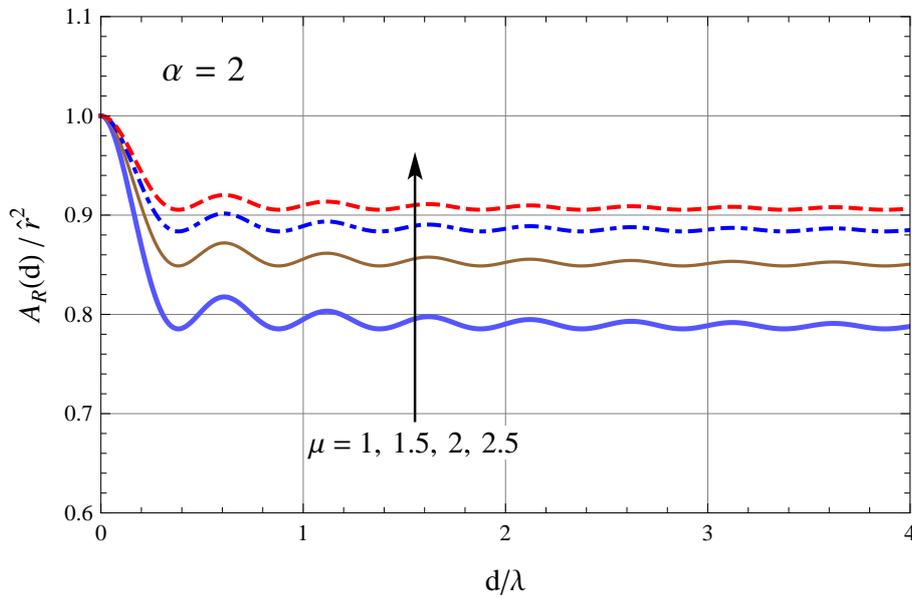


Figura 2.25: Função de autocorrelação da distribuição α - μ .

A Figura 2.26 mostra que as distribuições de Rayleigh, Nakagami- m e Weibull são casos particulares da distribuição α - μ , para determinados valores de seus parâmetros.

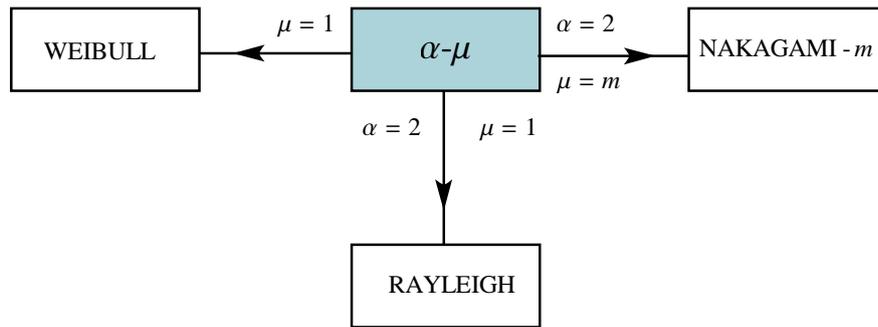


Figura 2.26: Distribuição α - μ e três de seus casos particulares.

3 DESCRIÇÃO DAS MEDIDAS DE CAMPO

Os dados de campo utilizados neste trabalho, foram obtidos em ruas do interior do Campus da Unicamp, em Campinas-SP, e no bairro Barão Geraldo, vizinho da universidade. A seguir, os ambientes de medição, assim como o sistema de transmissão e recepção serão descritos.

3.1 O AMBIENTE DE PROPAGAÇÃO E O SISTEMA DE MEDIÇÃO

As medições foram realizadas em ambiente externo, com o auxílio de um sistema de medição instalado em um automóvel, deslocando-se a uma velocidade média de 40 km/h.

As Figuras 3.1 e 3.2 apresentam uma foto de satélite da área em que as medições ocorreram e um mapa da mesma área, respectivamente.

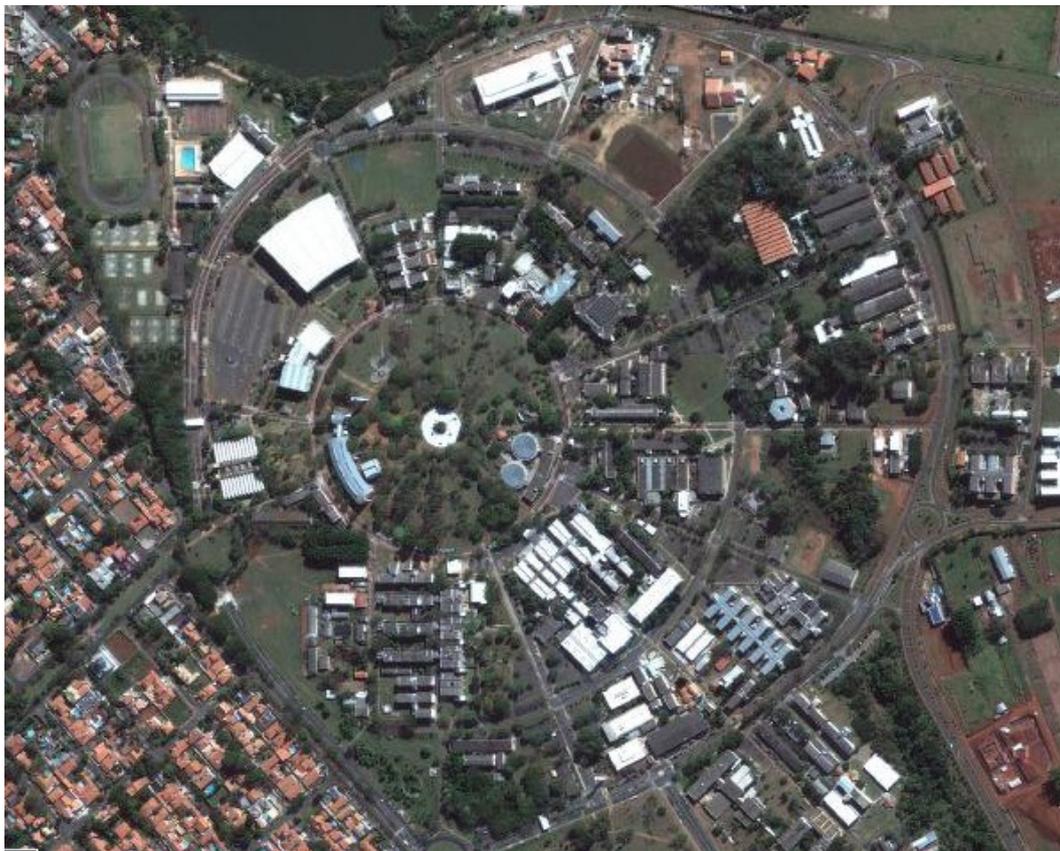


Figura 3.1: Foto de satélite da região da Unicamp onde foram realizadas as medidas.

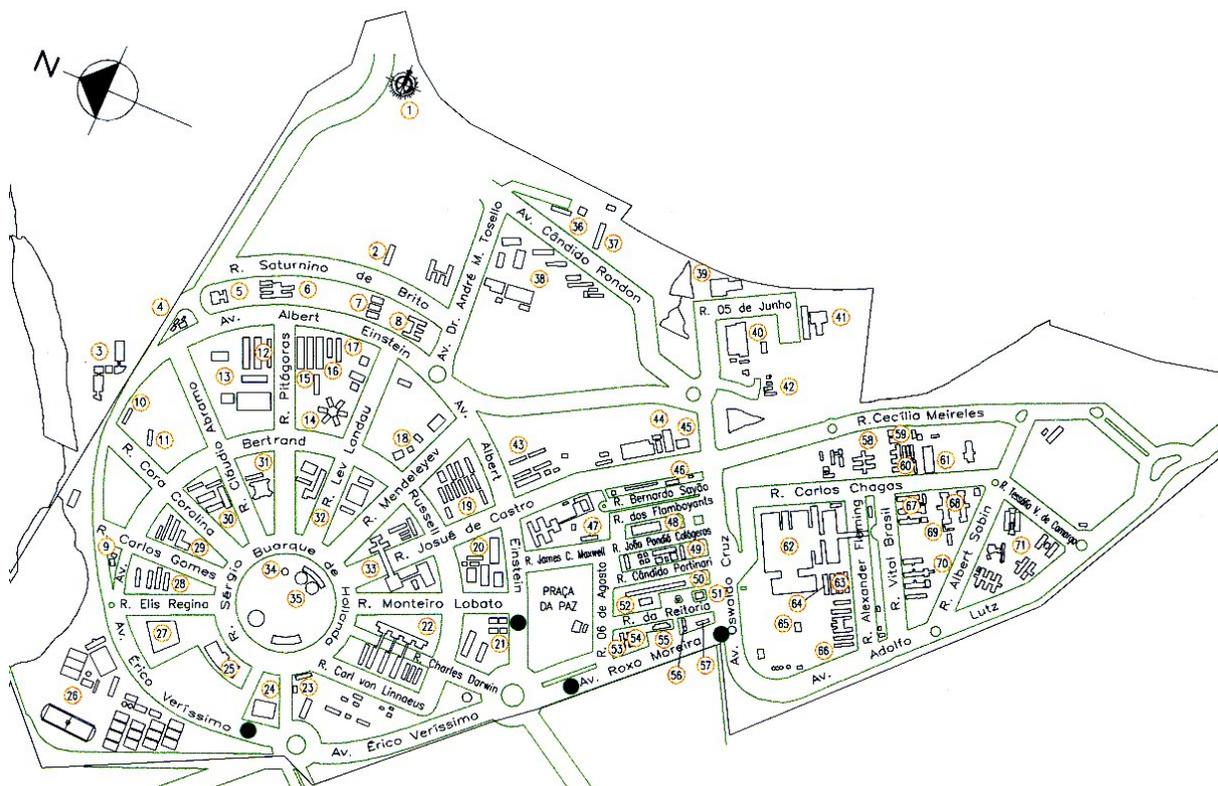


Figura 3.2: Mapa da região da Unicamp onde foram realizadas as medidas.

Foram percorridos dez trajetos diferentes durante a realização das medidas. Nesses trajetos foram encontrados vários cenários de propagação, com a presença de obstáculos (prédios, vegetação, veículos e pessoas) e também com a ocorrência ou não de visada direta. Foram feitas várias passagens em cada trajeto, sendo gerado um arquivo de dados em cada passagem, para que um eventual problema em um arquivo não implicasse na necessidade de refazer o trajeto em outra oportunidade. Ao todo foram gerados trinta e quatro arquivos de medidas. Os sinais foram coletados a uma taxa de $\lambda/180$. A frequência utilizada foi de 5,5 GHz.

A estação transmissora foi montada conforme a Figura 3.3. Nessa estação o sinal é gerado (Agilent E8257D PSG Analog Signal Generator) com a potência de 0 dBm e transmitido através de um cabo coaxial (Andrew FSJ4-50B) de 1,2 m até um amplificador de potência (HUGHES TWT, modelo 1177H06F000), de 30 dB de ganho. O sinal, assim amplificado é levado até a antena por um cabo coaxial de 6,2 m de comprimento, do mesmo tipo já citado. Foi utilizada uma antena (HUBER+SUHNER Planar Antenna) de 13,5 dBi. Essa antena diretiva foi utilizada apenas por uma questão de disponibilidade e foi direcionada, em cada percurso, de tal forma que estação receptora estivesse permanentemente dentro do ângulo de meia potência da mesma.

As especificações detalhadas dos itens que constituíram a estação transmissora podem ser encontradas no anexo A.

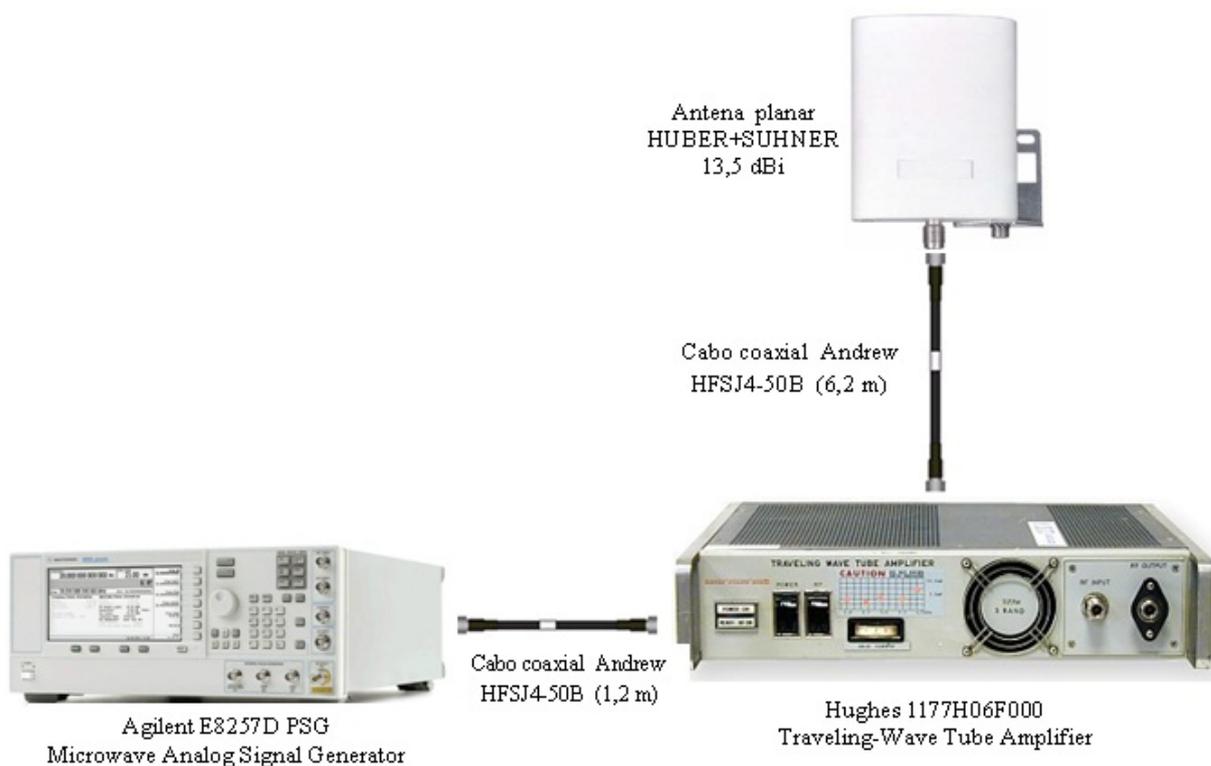


Figura 3.3: Configuração da estação transmissora.

A estação transmissora foi instalada no alto do prédio E da FEEC - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, a uma altura de, aproximadamente, 12 metros. Vide Figura 3.4. No mapa da Figura 3.2 esse prédio pode ser localizado na quadra que está assinalada com o número 47 inscrito em um círculo.



Figura 3.4: Localização da estação transmissora.

A estação receptora, montada no automóvel, seguiu a configuração mostrada na Figura 3.5. A antena foi posicionada na parte externa do veículo.

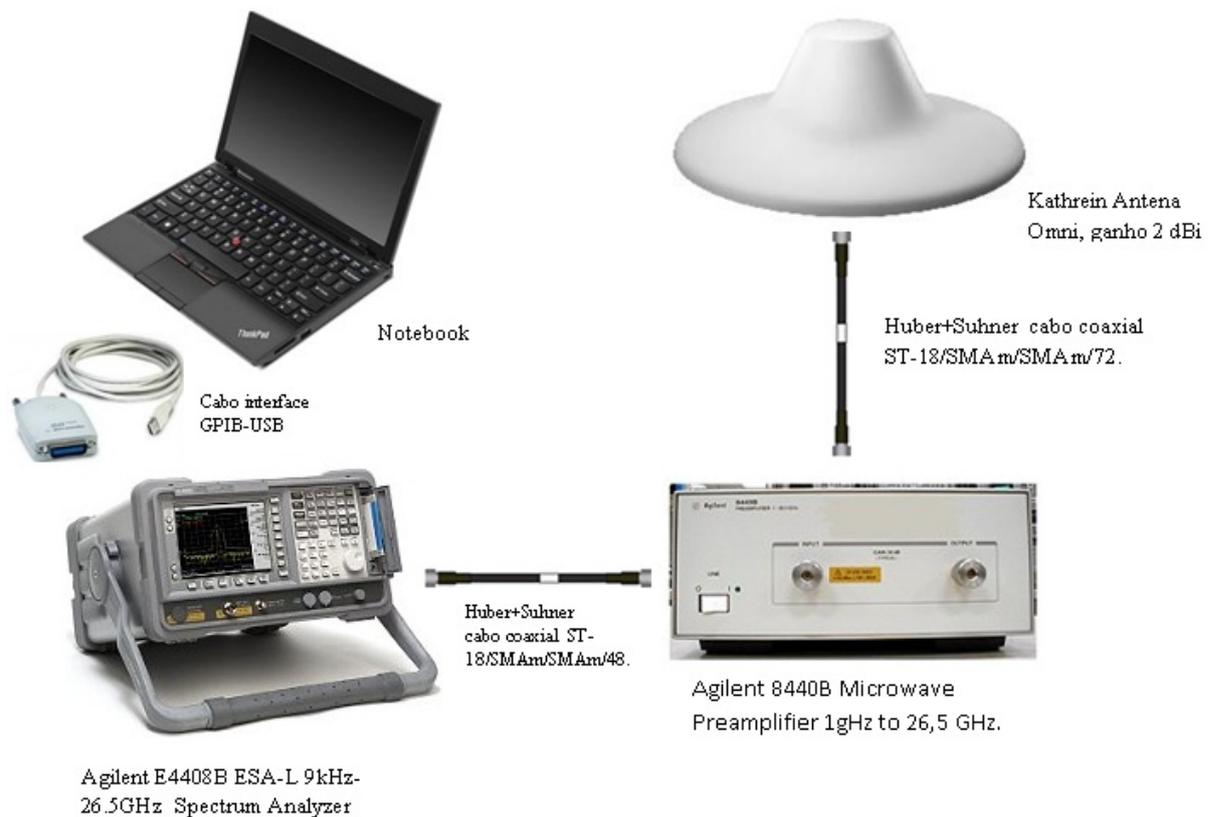


Figura 3.5: Configuração da estação receptora.

Na estação receptora o sinal recebido pela antena, situada na parte externa do automóvel, chega ao LNA (AGILENT 8449B Microwave Preamplifier) através de um cabo Huber+Suhner Sucotest de 72" de comprimento. O LNA introduz um ganho de 23,5 dB no sinal e transfere o mesmo ao analisador de espectro através de um cabo Huber+Suhner Sucotest de 48" de comprimento. O analisador de espectro (Agilent E4408B ESA-L 9kHz-26.5GHz) mede a potência do sinal recebido em dBm e passa essa informação através de sua porta GPIB para o computador. A interligação entre o analisador de espectro e o computador que armazenou os dados foi feita através de um cabo GPIB/USB.

No computador as amostras são pós-processadas em um programa escrito em Lab-View que elimina o desvanecimento de larga escala, filtrando o desvanecimento de pequena escala que é o objeto deste trabalho. As amostras coletadas são organizadas, pelo programa, na forma de colunas em um arquivo de texto.

Para realizar a filtragem do desvanecimento de pequena escala, as amostras do sinal, que foram coletadas em dBm, são transformadas em watts. Na sequência calcula-se para cada coluna o seu valor RMS. Calculados os valores RMS de cada coluna, cada amostra é dividida pelo valor RMS da sua coluna. Assim é eliminado o valor médio do sinal, ficando apenas o valor instantâneo que representa o desvanecimento de pequena escala. Por fim foi montado o arquivo de trabalho com a seguinte configuração:

Col 1	Col 2 a Col n	Col n+1	Col n+2 a Col 2n
Base de tempo [ms]	Valores medidos [W]	Zeros	Valores medidos [dBm]

O número de linhas em todos os arquivos foi fixado em 8021. A coluna de zeros apenas separa os valores medidos em W e em dBm.

Os arquivos assim formatados foram utilizados nas análises apresentadas no próximo capítulo.

4 OS RESULTADOS

4.1 INTRODUÇÃO

Após a obtenção do desvanecimento de pequena e a montagem dos arquivos de dados, as envoltórias dos sinais estão disponíveis para estudo. Neste capítulo apresentamos os resultados obtidos com o processamento dos dados disponíveis. Para o tratamento desses dados foi desenvolvido um programa utilizando o software Mathematica que executa as seguintes tarefas:

- Lê os dados dos arquivos de medidas de campo, no formato .txt, já descrito no capítulo 3;
- Extrai a envoltória normalizada;
- Calcula os parâmetros de desvanecimento das distribuições utilizadas neste trabalho:

Distribuição	Parâmetros
Rayleigh	-
Rice	k
Nakagami- m	m
Weibull	α_w
κ - μ	κ e μ
α - μ	α e μ

- Calcula as PDF's, CDF's e autocorrelações práticas e teóricas;
- Calcula os desvios das curvas teóricas em relação às curvas empíricas;
- Gera os os gráficos correspondentes.

Para o cálculo do desvio entre as curvas empíricas e teóricas foi utilizada a técnica do desvio médio absoluto percentual, obtido através da expressão $\delta = \frac{100 \sum_{i=1}^N |x_i - t_i|}{N}$, em que x_i representa os valores medidos e t_i representa os valores teóricos.

As campanhas de medição foram realizadas nas ruas listadas na Tabela 4.1 em que aparecem também o número de arquivos de medidas produzidos.

A Figura 4.1 mostra as ruas onde as campanhas de medição foram realizadas. Nessa figura não aparece o nome da rua Sérgio Buarque de Holanda, que é a rua da rotatória central do campus.

4.2 ESTIMADORES DE PARÂMETROS

Com exceção da distribuição Rayleigh, as demais distribuições utilizadas nesta dissertação possuem, em suas expressões matemáticas, parâmetros associados às características físicas do meio de propagação. A definição desses parâmetros é fundamental para o estudo que estamos realizando, em que buscamos comparar os desvios das curvas teóricas de diversas métricas com as curvas empíricas geradas a partir das medidas feitas em campo. Como os valores desses parâmetros são desconhecidos utilizamos estimadores disponíveis na literatura técnica a respeito do assunto.

Assim sendo, em nossos cálculos utilizamos os seguintes estimadores de parâmetros:

1. Distribuição Nakagami- m

O parâmetro m foi estimado de acordo com [18]

$$m = \frac{1}{\text{Var}[\rho^2]}. \quad (4.1)$$

2. Distribuição de Rice

O parâmetro k foi estimado através da expressão [18]

$$k = \frac{\sqrt{m^2 - m}}{m - \sqrt{m^2 - m}}. \quad (4.2)$$

3. Distribuição de Weibull

O parâmetro α_w foi estimado pela expressão

$$\frac{E^2(\rho)}{E(\rho^2)} = \frac{\Gamma^2\left(\frac{1}{\alpha_w} + 1\right)}{\Gamma\left(\frac{2}{\alpha_w} + 1\right)}, \quad (4.3)$$

em que $E(\cdot)$ é o operador espectância. Essa expressão foi obtida de [22, eq. 3], em que foram assumidos $i = 2$ e $j = 1$.

4. Distribuição κ - μ

O primeiro parâmetro, κ , foi estimado de acordo com [8, eq. 12]

$$\kappa^{-1} = \frac{\sqrt{2}[E(\rho^4) - 1]}{\sqrt{2E^2(\rho^4) - E(\rho^4) - E(\rho^6)}} - 2. \quad (4.4)$$

O segundo parâmetro, μ foi estimado de acordo com [8, eq. 9]

$$\mu = \frac{2\kappa + 1}{\text{Var}(\rho^2) (\kappa + 1)^2}. \quad (4.5)$$

5. Distribuição α - μ

Para esta distribuição os parâmetros α e μ foram estimados através da solução de um sistema de equações gerado a partir de [25, eq. 4], fazendo-se $\beta=1$ e $\beta=2$

$$\frac{E^2(\rho)}{E(\rho^2) - E^2(\rho)} = \frac{\Gamma^2\left(\mu + \frac{1}{\alpha}\right)}{\Gamma(\mu)\Gamma\left(\mu + \frac{2}{\alpha}\right) - \Gamma^2\left(\mu + \frac{1}{\alpha}\right)}, \quad (4.6)$$

$$\frac{E^2(\rho^2)}{E(\rho^4) - E^2(\rho^2)} = \frac{\Gamma^2\left(\mu + \frac{2}{\alpha}\right)}{\Gamma(\mu)\Gamma\left(\mu + \frac{4}{\alpha}\right) - \Gamma^2\left(\mu + \frac{2}{\alpha}\right)}. \quad (4.7)$$

4.3 RESULTADOS OBTIDOS EM CADA TRAJETO

Nesta seção apresentamos os resultados dos estudos que realizamos com os dados das medidas coletadas. Dividimos os resultados por trajeto onde foram coletadas as amostras. De cada trajeto selecionamos um arquivo de medidas que produziu os resultados que julgamos mais significativos.

4.3.1 Trajeto 1

Os dados aqui tratados foram obtidos na Av. Prof. Atílio Martini, partindo da praça do Henfil, situada no campus da Unicamp, e seguindo no sentido do centro da cidade. A Figura 4.2 mostra uma foto da parte inicial da avenida na direção do centro da cidade. Nesse trajeto foram coletados quatro arquivos de medidas, dos quais selecionamos um que após processamento apresentou os parâmetros de desvanecimento listados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Parâmetros de desvanecimento calculados.

Rice	Nakagami- m	Weibull	κ - μ		α - μ	
k	m	α_w	κ	μ	α	μ
0.670015	1.19184	2.16648	0.878622	0.931141	2.30426	0.902935

Os gráficos da PDF e CDF gerados com as medições feitas nessa avenida, apresentados nas Figuras 4.3 e 4.4, mostram o melhor ajuste com a Distribuição Rice, o que caracteriza um ambiente com predominância de visada direta. As quantificações percentuais dos desvios também são mostradas nas figuras.



Figura 4.2: Vista parcial da Av. Prof. Atílio Martini (1).

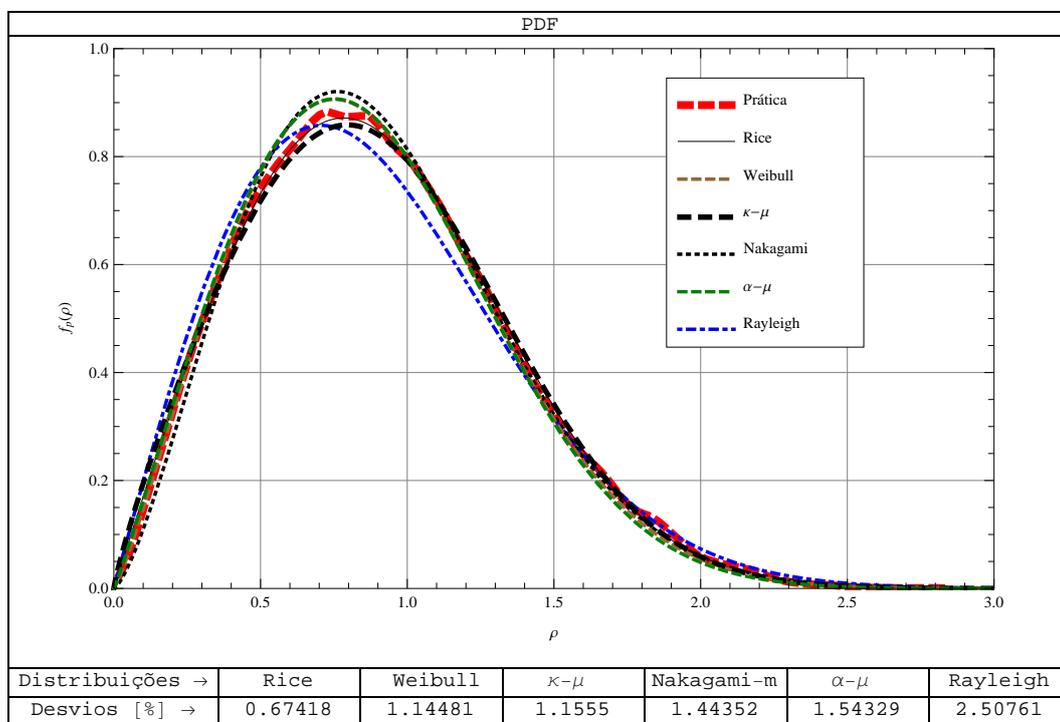


Figura 4.3: Desvios entre a curva prática e as curvas teóricas.

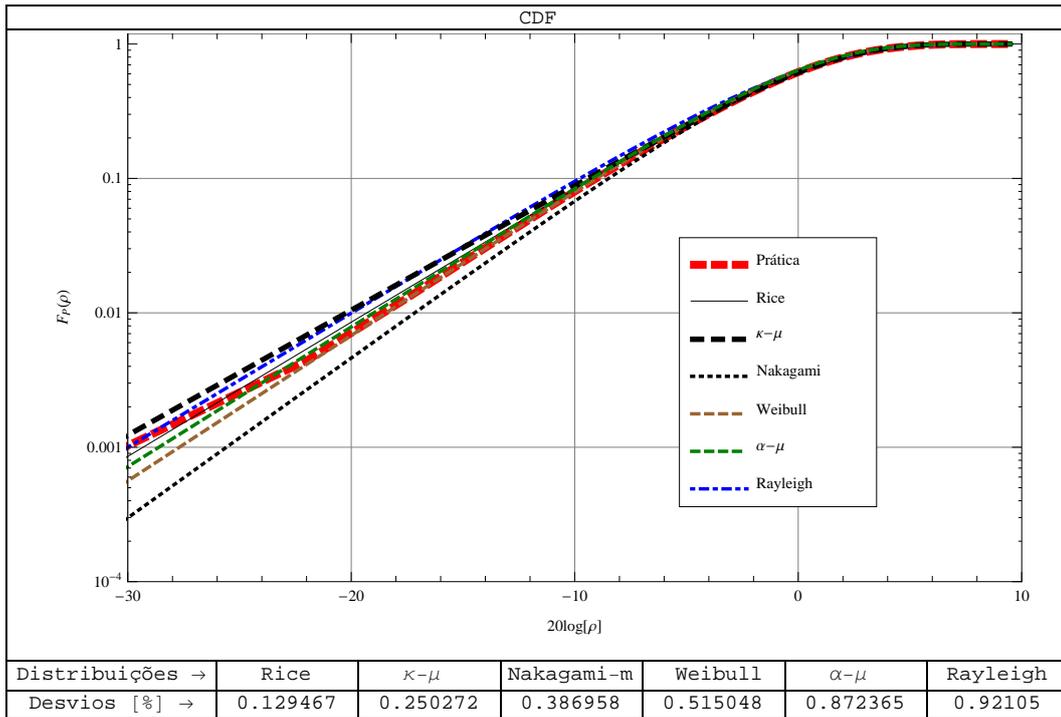


Figura 4.4: Desvios entre a curva prática e as curvas teóricas.

No caso da autocorrelação, a Figura 4.5 revela que, neste trajeto o melhor ajuste ficou com a distribuição Nakagami- m .

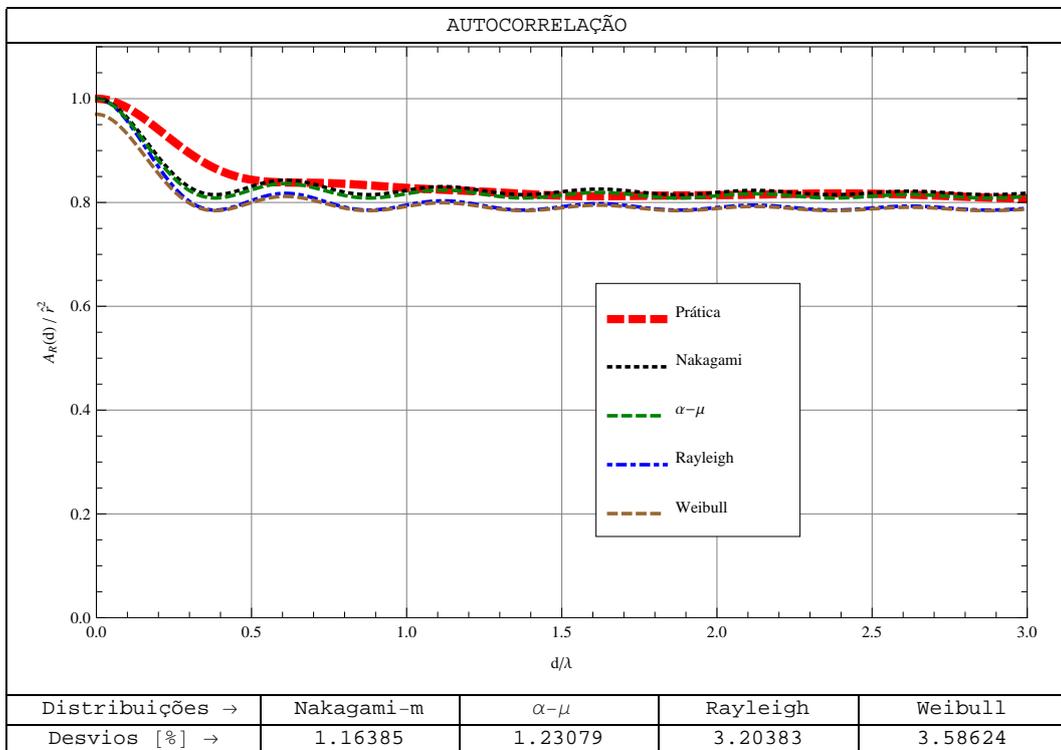


Figura 4.5: Desvios entre a curva prática e as curvas teóricas.

4.3.2 Trajeto 2

Os dados aqui tratados foram obtidos na Av. Prof. Atílio Martini, partindo de um determinado ponto da avenida e dirigindo-se à praça do Henfil, situada no campus. A Figura 4.6 mostra uma foto de parte do trajeto.



Figura 4.6: Vista parcial da Av. Prof. Atílio Martini (2).

Também neste trajeto foram coletados quatro arquivos de dados, dos quais selecionamos um que, após processamento, apresentou os parâmetros de desvanecimento listados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Parâmetros de desvanecimento calculados.

Rice	Nakagami- m	Weibull	κ - μ		α - μ	
k	m	α_w	κ	μ	α	μ
0.407739	1.09157	2.07766	0.524639	0.962321	2.16381	0.934218

Verificamos, também nesse trajeto, através dos gráficos da PDF e CDF mostrados nas Figuras 4.7 e 4.8, que o desvio das curvas teóricas em relação à curva empírica é menor para a distribuição Rice e maior para a Distribuição Rayleigh, confirmando a caracterização de um ambiente multipercurso com a presença também de sinal direto.

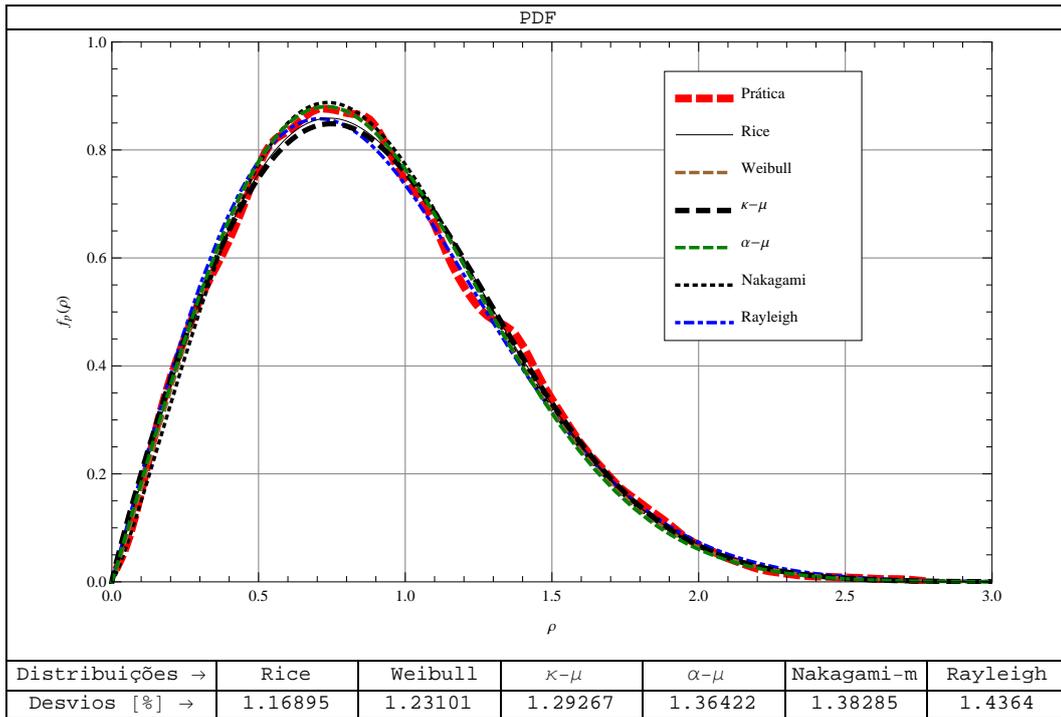


Figura 4.7: Desvios entre a curva prática e as curvas teóricas.

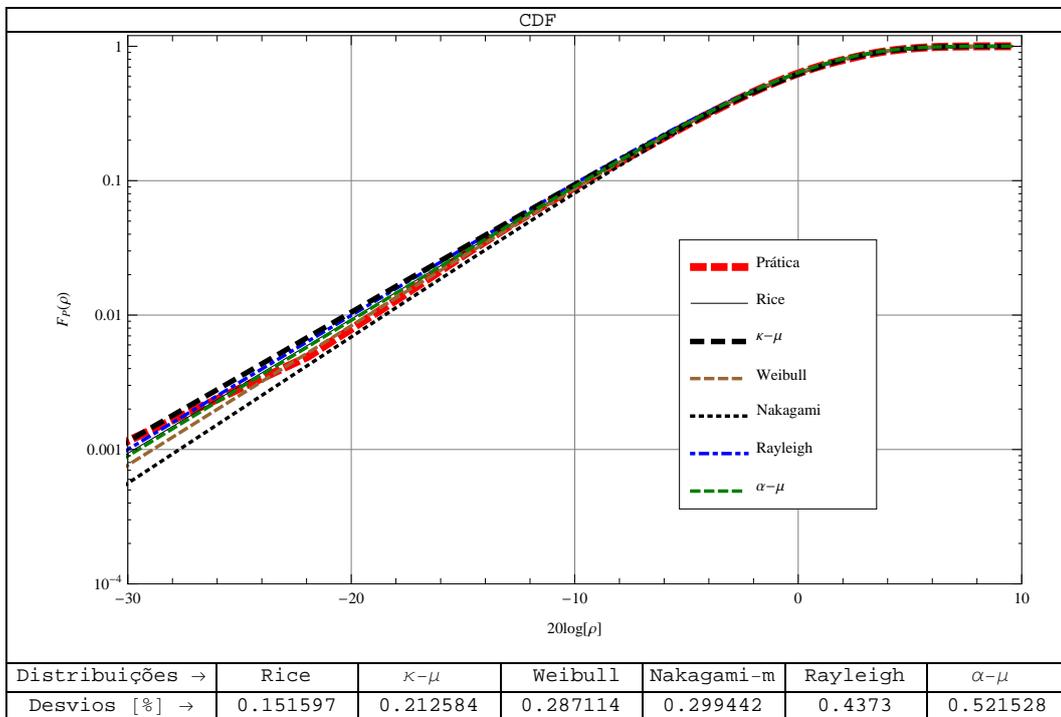


Figura 4.8: Desvios entre a curva prática e as curvas teóricas.

No caso da autocorrelação, Figura 4.9, neste trajeto o melhor ajuste ficou com a distribuição Nakagami- m , repetindo o resultado do trajeto feito no sentido inverso, tratado na subseção anterior.

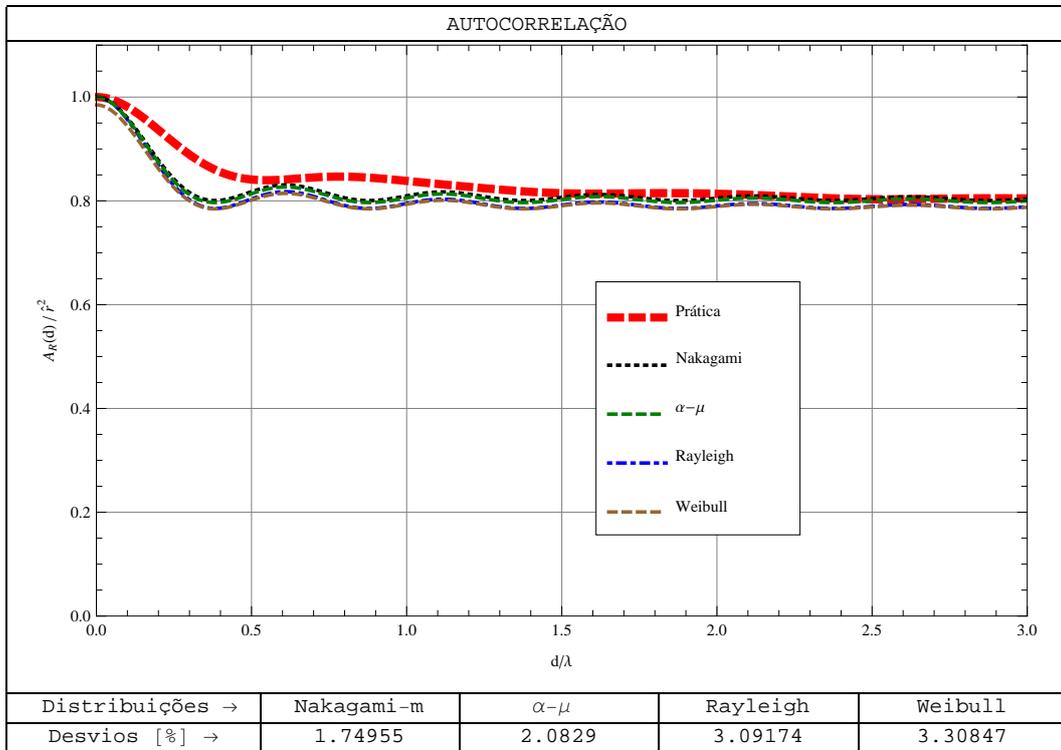


Figura 4.9: Desvios entre a curva prática e as curvas teóricas.

4.3.3 Trajeto 3

Os dados desse trajeto foram coletados na rua Dr. Antônio Augusto de Almeida. A figura 4.10 mostra uma foto parcial da rua, por onde passou o sistema de medidas.

Neste trajeto foram coletados três arquivos de dados, dos quais selecionamos um que após processamento apresentou os parâmetros de desvanecimento listados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Parâmetros de desvanecimento calculados.

Rice	Nakagami- m	Weibull	$\kappa-\mu$		$\alpha-\mu$	
k	m	α_w	κ	μ	α	μ
0.410428	1.09251	2.08053	0.637005	0.9270831	2.15301	0.944217

As Figuras 4.11 e 4.12, registram que, também nesta rua, estiveram presentes o multipercurso e o raio direto. Na Figura 4.13 da autocorrelação, o melhor ajuste ocorreu novamente para a distribuição Nakagami- m , fato este que vai se repetir em todas as ruas estudadas.



Figura 4.10: Rua Dr. Antônio Augusto de Almeida

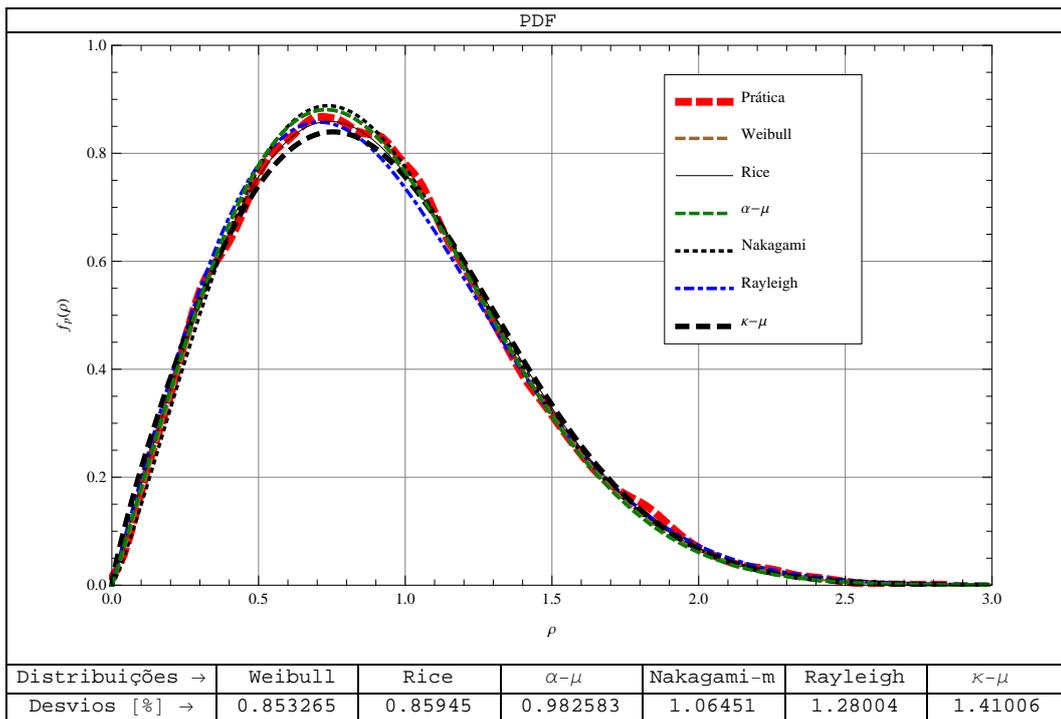


Figura 4.11: Desvios entre a curva prática e as curvas teóricas.

Para a autocorrelação, a Figura 4.13 mostra que, neste trajeto, o melhor ajuste ficou com a distribuição Nakagami- m , seguida da distribuição $\kappa-\mu$.

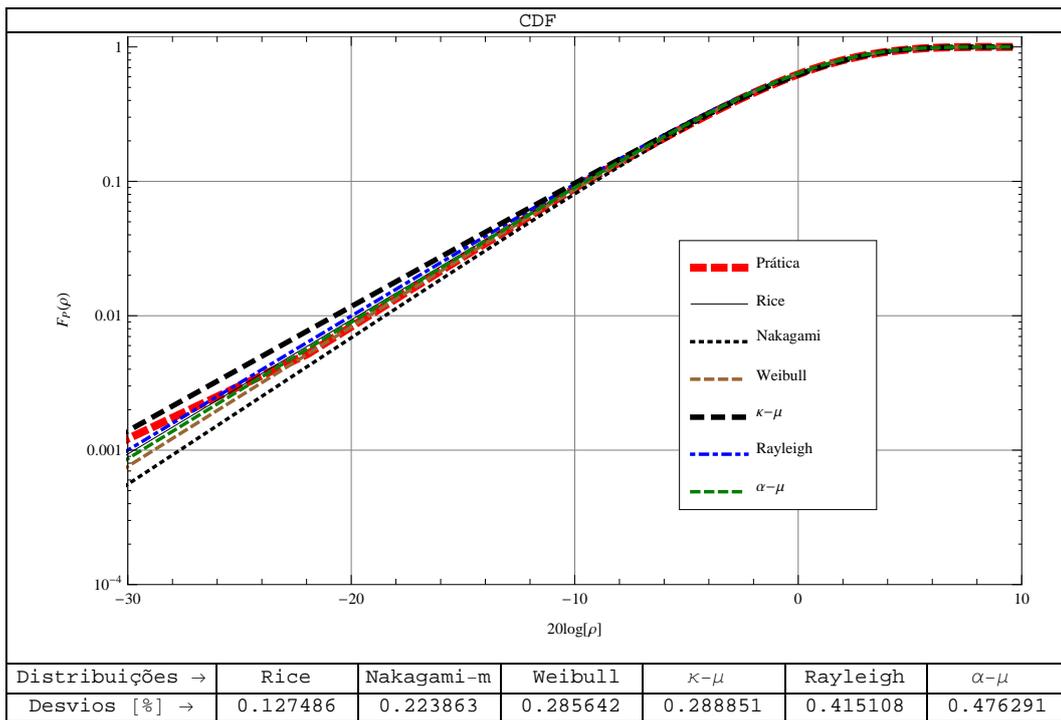


Figura 4.12: Desvios entre a curva prática e as curvas teóricas.

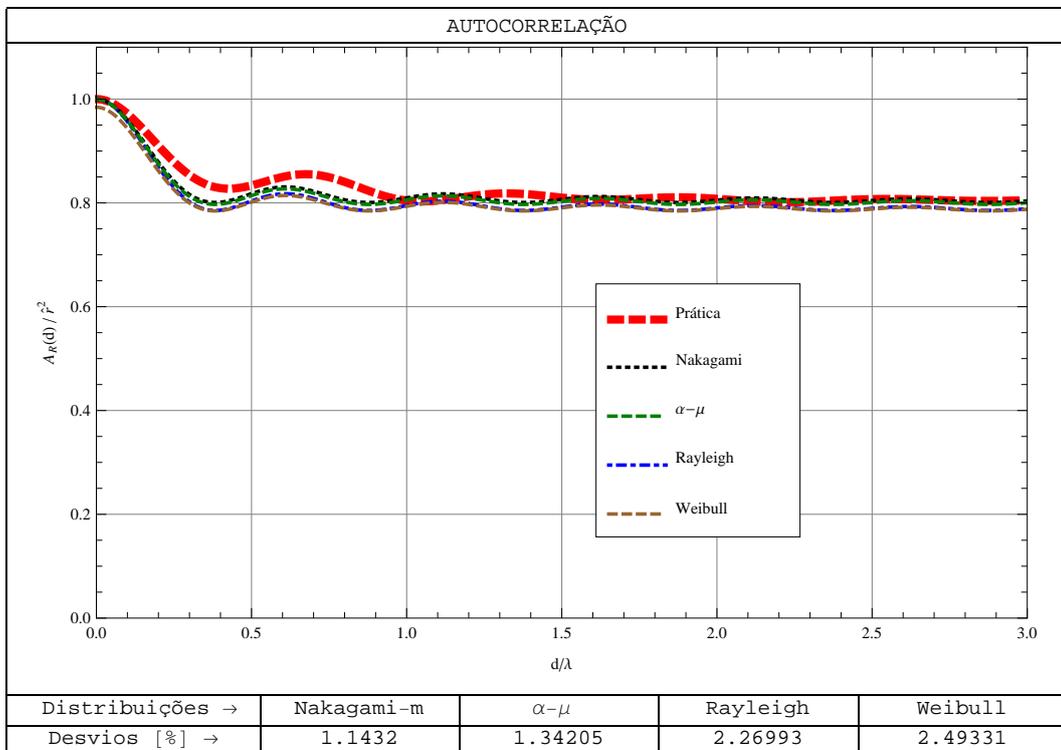


Figura 4.13: Desvios entre a curva prática e as curvas teóricas.

4.3.4 Trajeto 4

Os dados deste trajeto foram obtidos na rua Cora Coralina. Nessa rua foram coletados seis arquivos de dados, dos quais selecionamos um que, após processamento, apresentou os parâmetros de desvanecimento listados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Parâmetros de desvanecimento calculados.

Rice	Nakagami- m	Weibull	κ - μ		α - μ	
k	m	α_w	κ	μ	α	μ
0.841714	1.26402	2.20147	1.29615	0.861245	2.58841	0.769064

As Figuras 4.14 e 4.15, mostram que tanto para a PDF quanto para a CDF as distribuições que tiveram os menores desvios foram Rice e κ - μ , nesta ordem, exatamente as distribuições que, além do multipercurso contemplam também uma onda de intensidade superior às demais no interior de cada *cluster*.

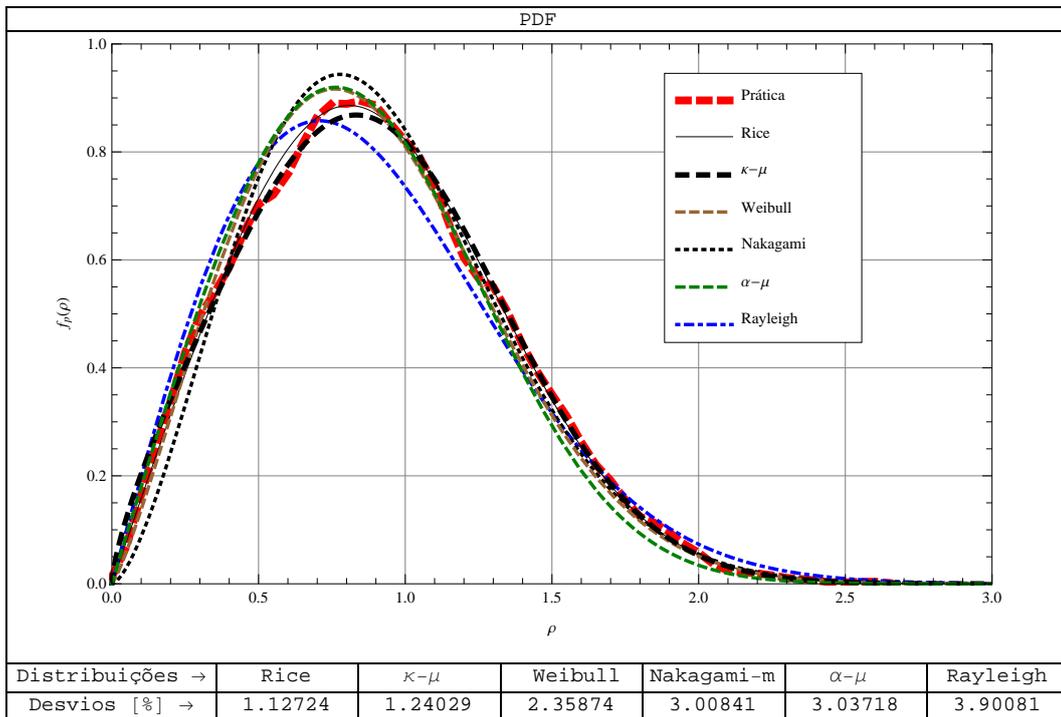


Figura 4.14: Desvios entre a curva prática e as curvas teóricas.

As curvas da autocorrelação deste trajeto, Figura 4.16, mostram que o menor desvio ficou com a distribuição Nakagami- m , seguida da distribuição κ - μ .

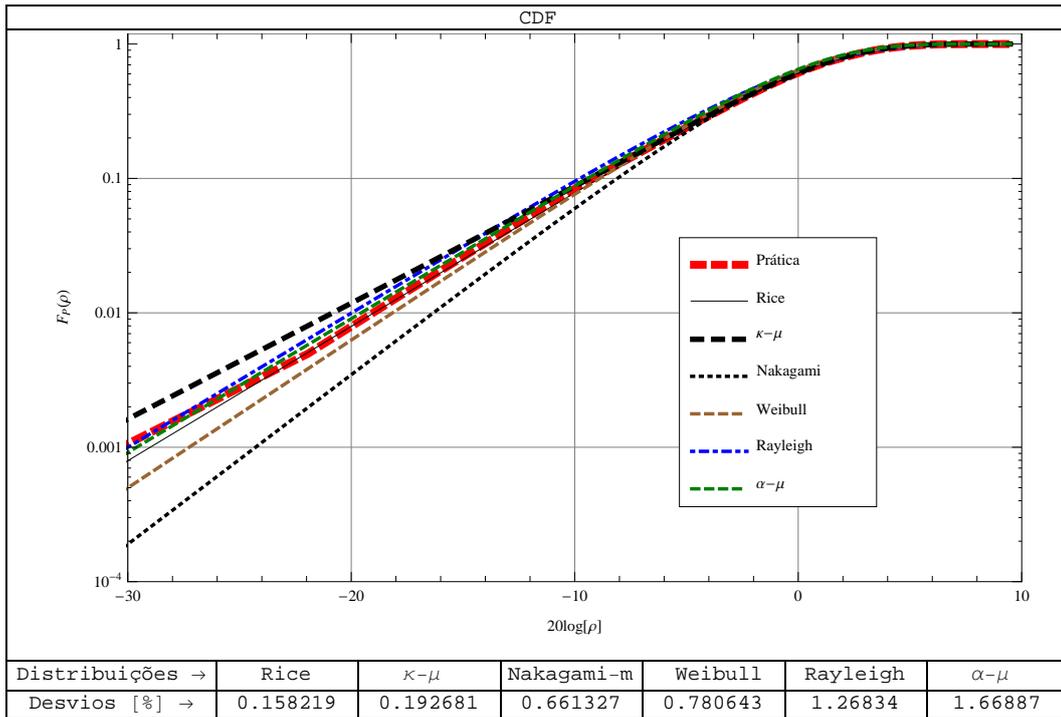


Figura 4.15: Desvios entre a curva prática e as curvas teóricas.

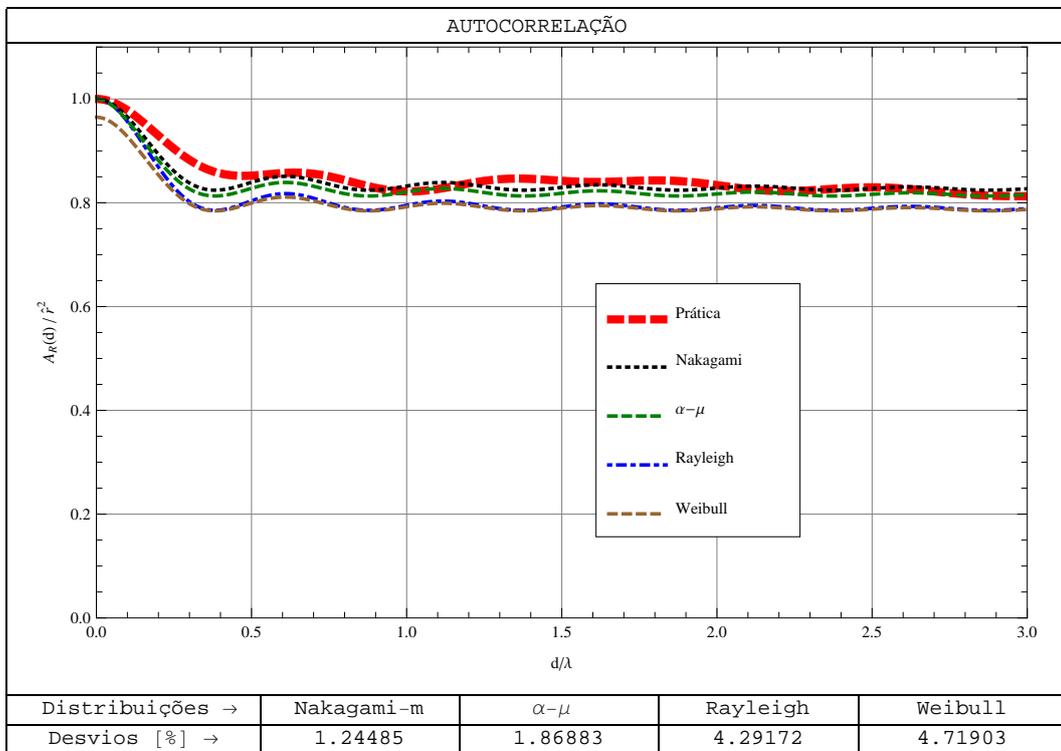


Figura 4.16: Desvios entre a curva prática e as curvas teóricas.

4.3.5 Trajeto 5

Neste trajeto foram coletados dois arquivos de dados, na rua Bertrand Russel, dos quais selecionamos um que, após processamento, apresentou os parâmetros de desvanecimento listados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6: Parâmetros de desvanecimento calculados.

Rice	Nakagami- m	Weibull	κ - μ		α - μ	
k	m	α_w	κ	μ	α	μ
0.574306	1.15351	2.16288	0.096693	1.14454	2.07185	1.07526

As Figuras 4.17 e 4.18, mostram que, tanto para a PDF quanto para a CDF, a distribuição que teve os menores desvios foi a κ - μ , o que caracteriza meio de transmissão com a presença de multipercurso com a existência de componente dominante do sinal de rádio.

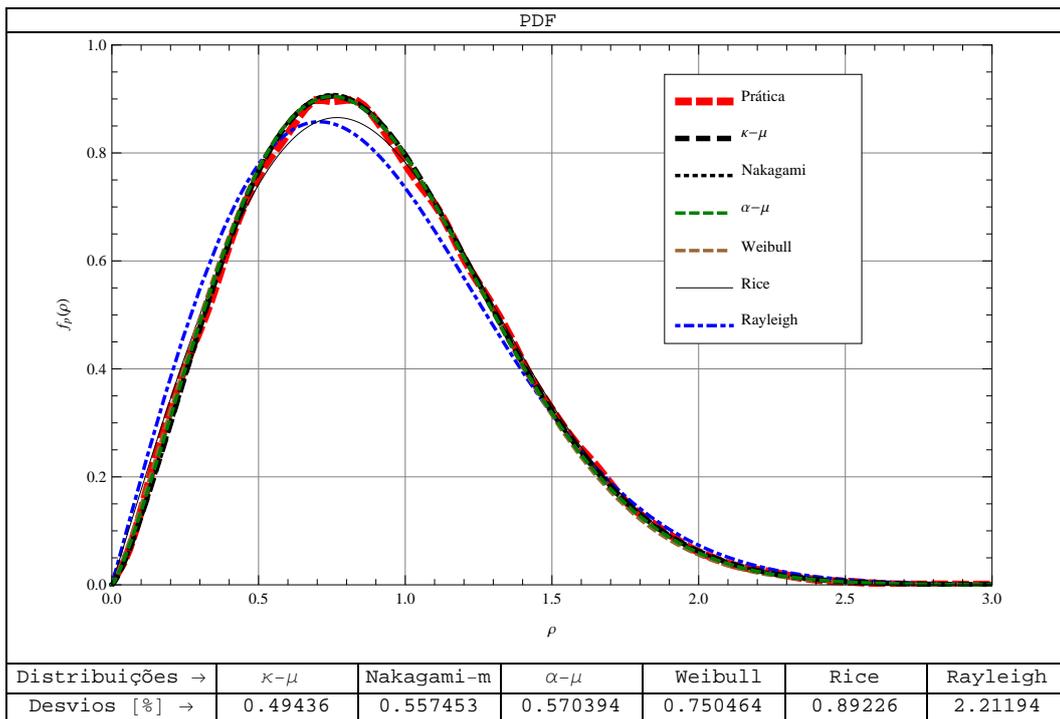


Figura 4.17: Desvios entre a curva prática e as curvas teóricas.

As curvas da autocorrelação deste trajeto, Figura 4.19, mostram que o menor desvio ficou com a distribuição Nakagami- m , seguida da distribuição κ - μ .

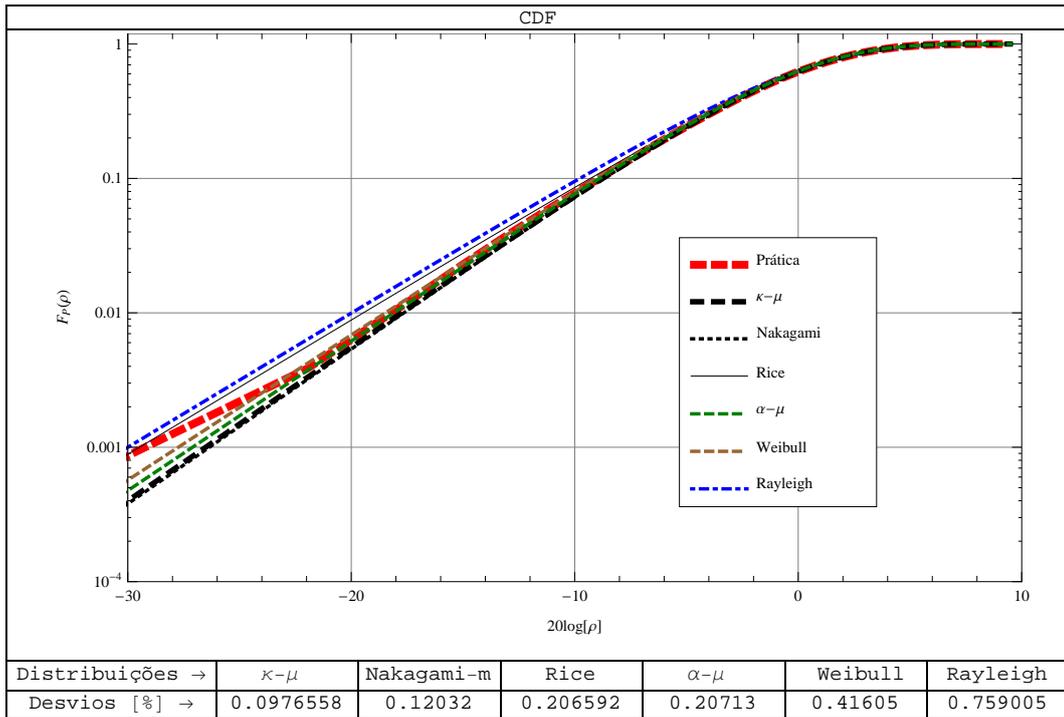


Figura 4.18: Desvios entre a curva prática e as curvas teóricas.

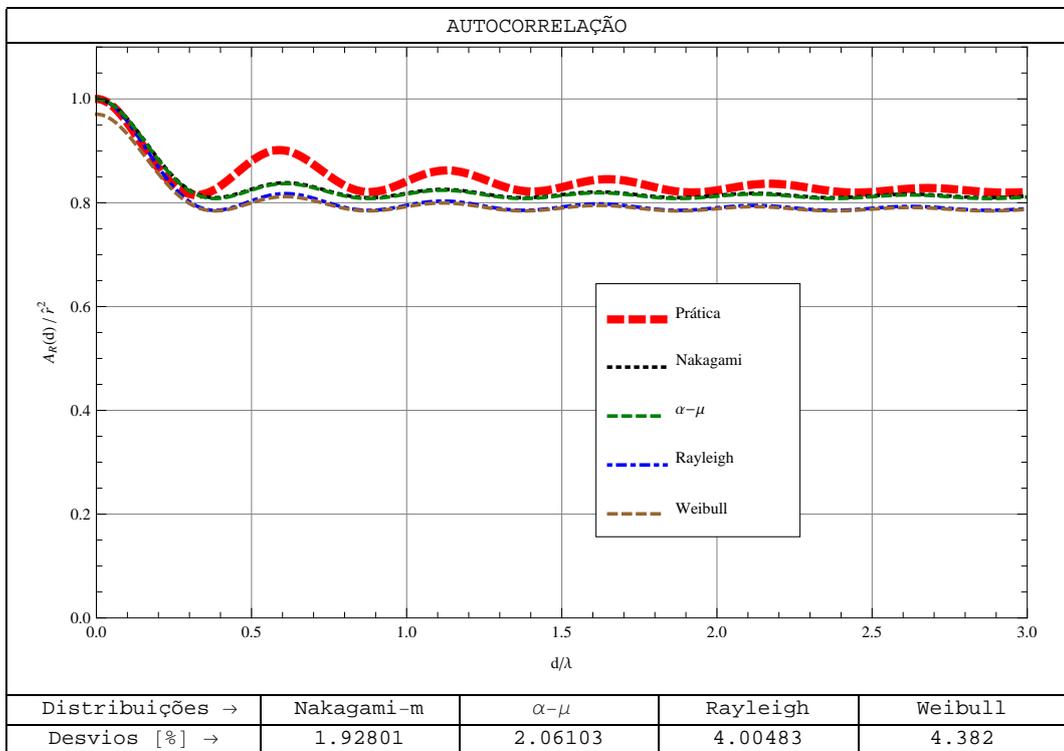


Figura 4.19: Desvios entre a curva prática e as curvas teóricas.

4.3.6 Trajeto 6

Neste trajeto foram coletados cinco arquivos de dados, na rua Elis Regina, dos quais selecionamos um que, após processamento, apresentou os parâmetros de desvanecimento listados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7: Parâmetros de desvanecimento calculados.

Rice	Nakagami- m	Weibull	κ - μ		α - μ	
k	m	α_w	κ	μ	α	μ
0.46244	1.1111	2.08658	0.919577	0.856112	2.24368	0.886228

As Figuras 4.20 e 4.21, mostram que tanto para a PDF quanto para a CDF a distribuição que teve os menores desvios foi Rice, o que caracteriza meio de transmissão com a presença de multipercurso e também de uma onda direta.

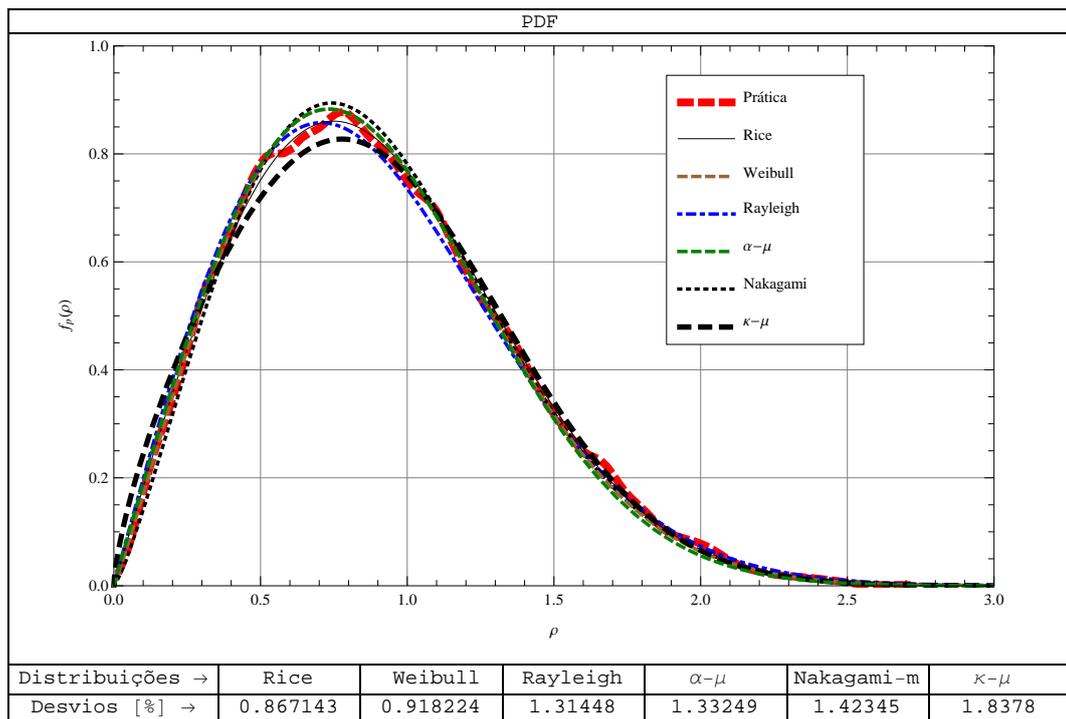


Figura 4.20: Desvios entre a curva prática e as curvas teóricas.

Neste trajeto as curvas da autocorrelação, Figura 4.22, mostram um menor desvio para a distribuição Nakagami- m , seguida da distribuição κ - μ .

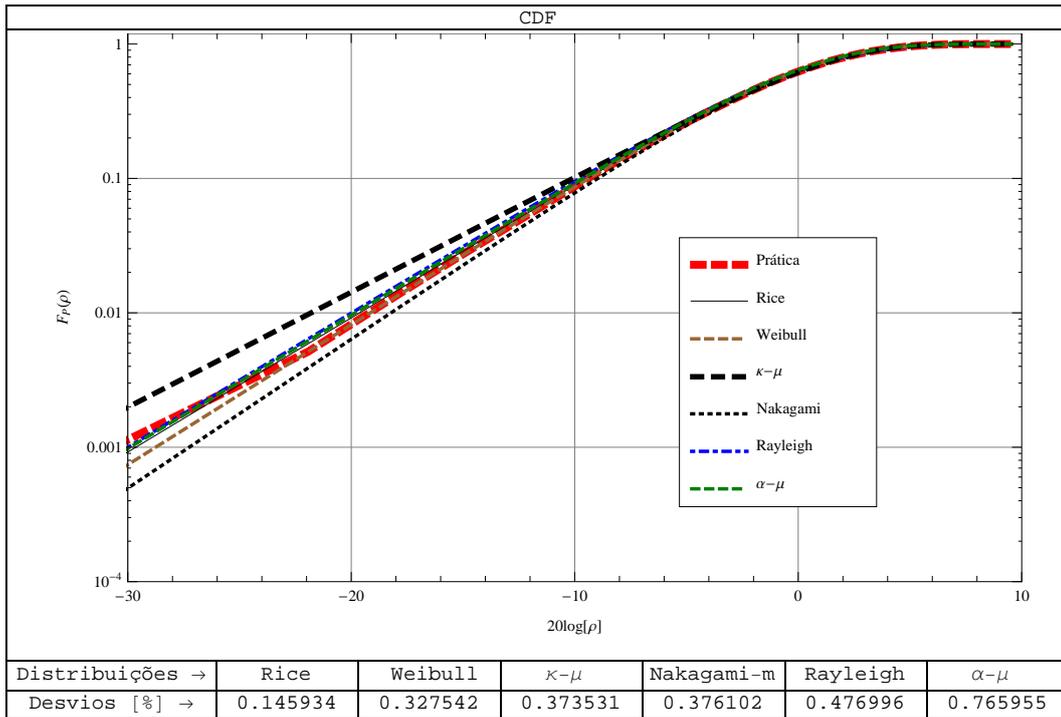


Figura 4.21: Desvios entre a curva prática e as curvas teóricas.

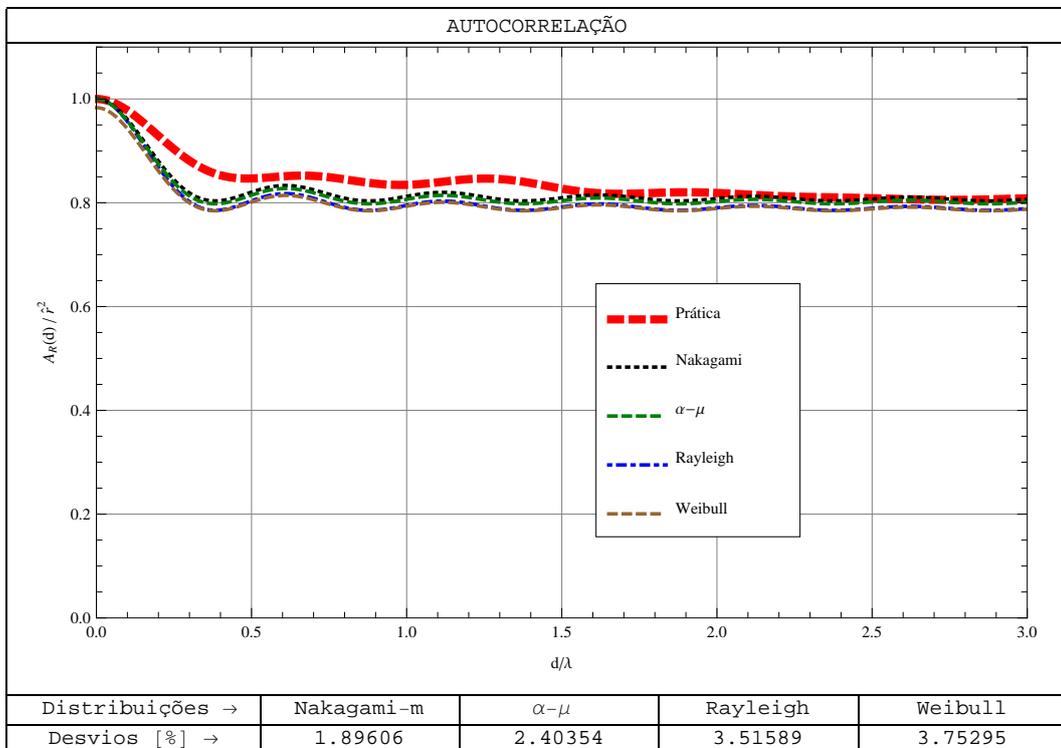


Figura 4.22: Desvios entre a curva prática e as curvas teóricas.

4.3.7 Trajeto 7

Os dados aqui tratados foram obtidos na Rua Luverci Pereira de Souza. A Figura 4.23 mostra uma foto de um trecho dessa rua, por onde passou o aparato de medições.



Figura 4.23: Rua Luverci Pereira de Souza.

Neste trajeto foram coletados três arquivos de dados, dos quais selecionamos um que, após o processamento, apresentou os parâmetros de desvanecimento listados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8: Parâmetros de desvanecimento calculados.

Rice	Nakagami- m	Weibull	κ - μ		α - μ	
k	m	α_w	κ	μ	α	μ
0.461685	1.11082	2.09741	0.331942	1.04183	2.17592	0.940368

As Figuras 4.24 e 4.25, mostram que tanto para a PDF quanto para a CDF as distribuições que tiveram os menores desvios foram Rice e κ - μ , nesta ordem, exatamente as distribuições que, além do multipercurso contemplam também uma onda de intensidade superior às demais no interior de cada *cluster*.

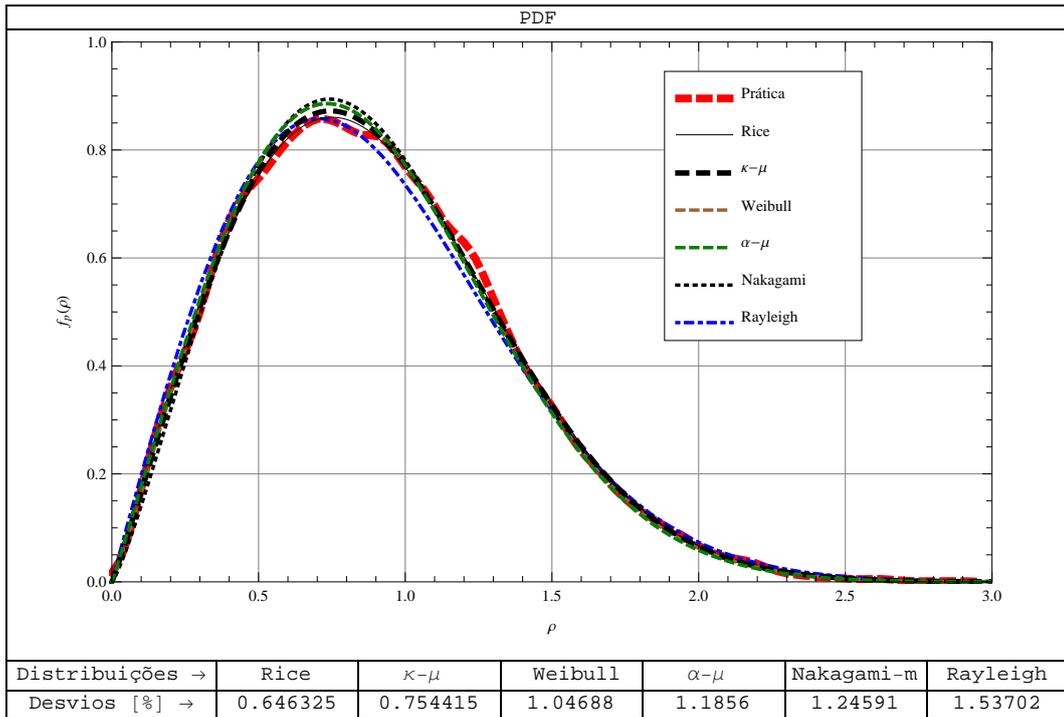


Figura 4.24: Desvios entre a curva prática e as curvas teóricas.

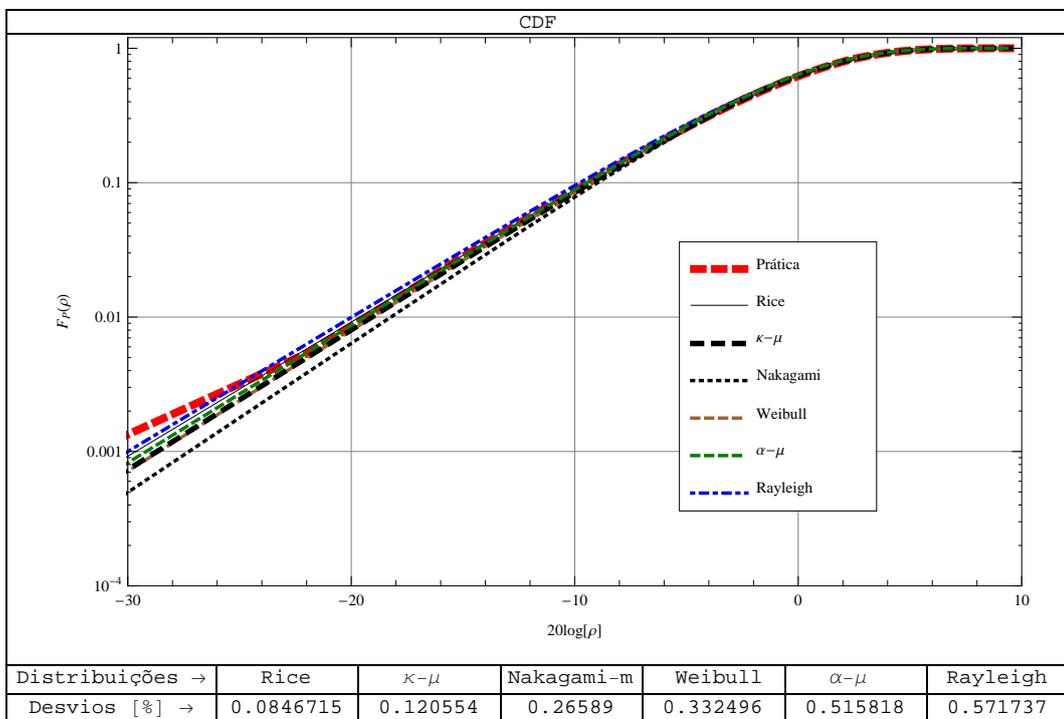


Figura 4.25: Desvios entre a curva prática e as curvas teóricas.

Neste trajeto as curvas da autocorrelação, Figura 4.22, mostram um menor desvio para a distribuição Nakagami- m , seguida da distribuição κ - μ .

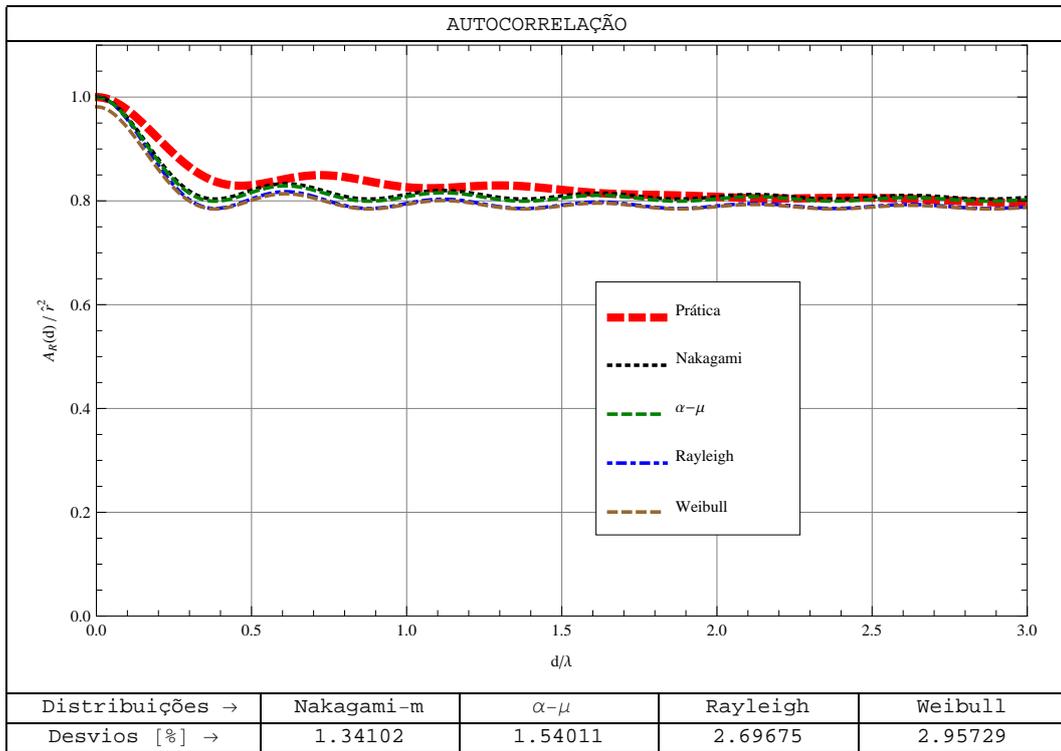


Figura 4.26: Desvios entre a curva prática e as curvas teóricas.

4.3.8 Trajeto 8

Os dados aqui tratados foram obtidos na Rua Ruberlei Boareto da Silva. A Figura 4.27 mostra uma foto de um trecho dessa rua, por onde passou o aparato de medições.



Figura 4.27: Rua Ruberlei Boareto da Silva.

Neste trajeto foram coletados três arquivos de dados, dos quais selecionamos um que após processamento apresentou os parâmetros de desvanecimento listados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9: Parâmetros de desvanecimento calculados.

Rice	Nakagami- m	Weibull	κ - μ		α - μ	
k	m	α_w	κ	μ	α	μ
0.3358	1.06746	2.06042	0.454181	0.963328	2.10304	0.966121

As Figuras 4.28 e 4.29, mostram que tanto para a PDF quanto para a CDF as distribuições que tiveram os menores desvios foram Rice e κ - μ , exatamente as distribuições que, além do multipercurso contemplam também uma onda de intensidade superior às demais no interior de cada *cluster*.

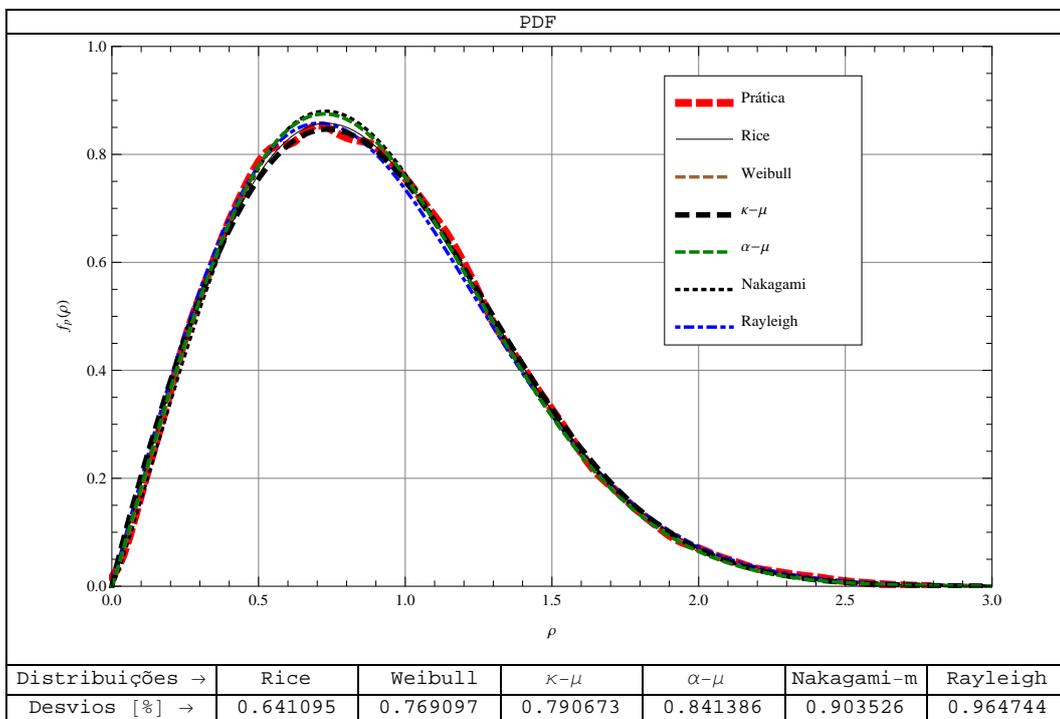


Figura 4.28: Desvios entre a curva prática e as curvas teóricas.

No caso da autocorrelação, a análise da Figura 4.30 revela que, neste trajeto, o menor desvio ficou com a distribuição Nakagami- m , seguida da distribuição κ - μ .

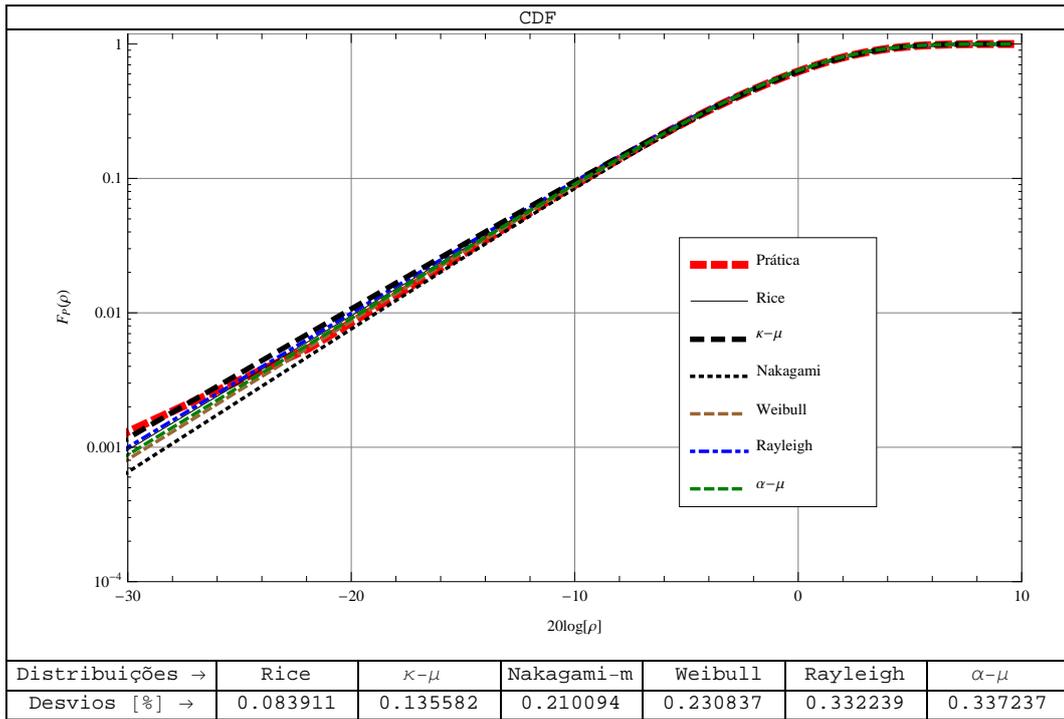


Figura 4.29: Desvios entre a curva prática e as curvas teóricas.

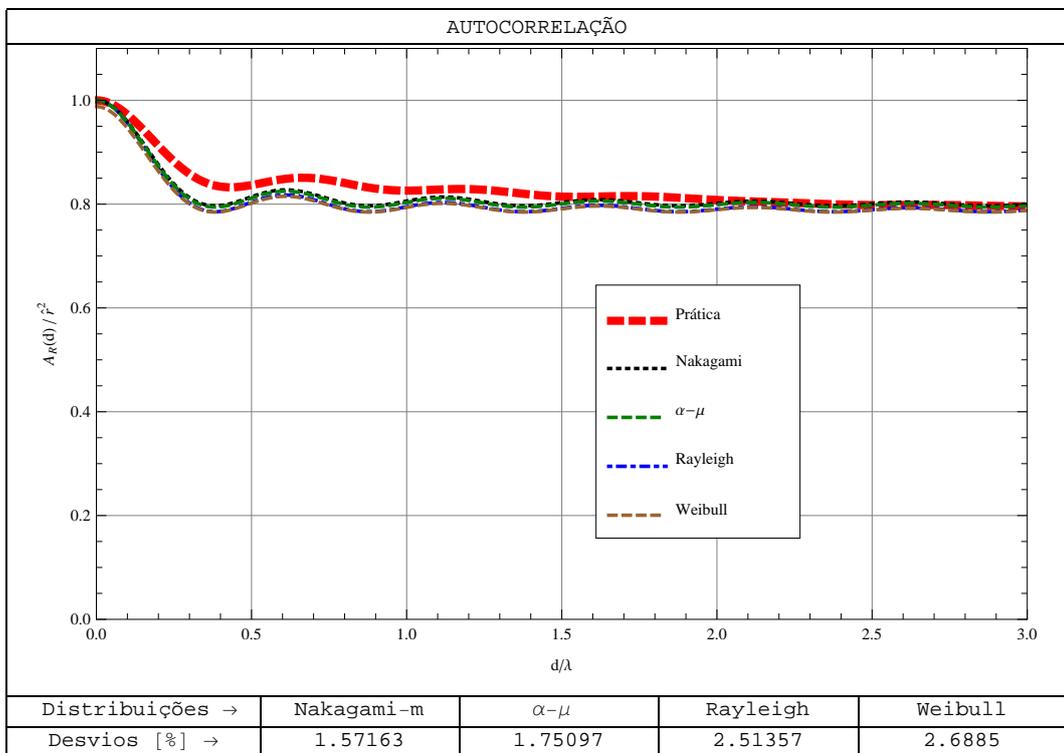


Figura 4.30: Desvios entre a curva prática e as curvas teóricas.

4.3.9 Trajeto 9

Os dados aqui tratados foram obtidos na Rua Sérgio Buarque de Holanda.

Neste trajeto foram coletados dois arquivos de dados, dos quais selecionamos um que, após processamento, apresentou os parâmetros de desvanecimento listados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10: Parâmetros de desvanecimento calculados.

Rice	Nakagami- m	Weibull	κ - μ		α - μ	
k	m	α_w	κ	μ	α	μ
0.413793	1.09369	2.09048	0.278143	1.0419	2.10219	0.990636

As Figuras 4.31 e 4.32, mostram que tanto para a PDF quanto para a CDF as distribuições que tiveram os menores desvios foram κ - μ e Rice, distribuições que, além do multipercurso contemplam também uma onda de intensidade superior às demais no interior de cada *cluster*.

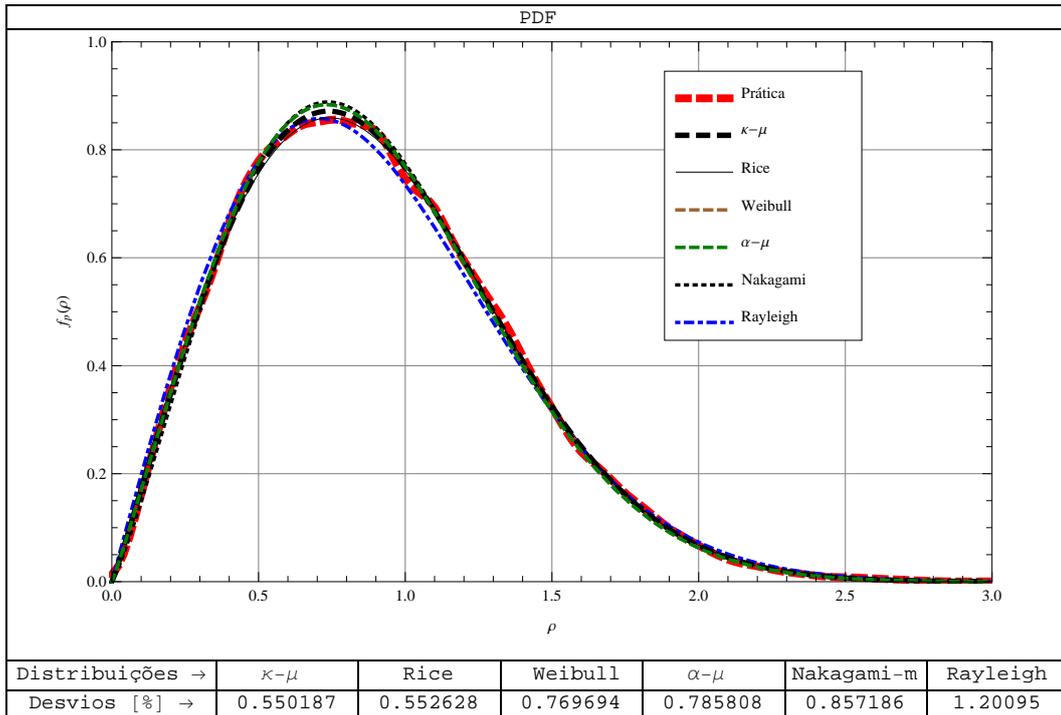


Figura 4.31: Desvios entre a curva prática e as curvas teóricas.

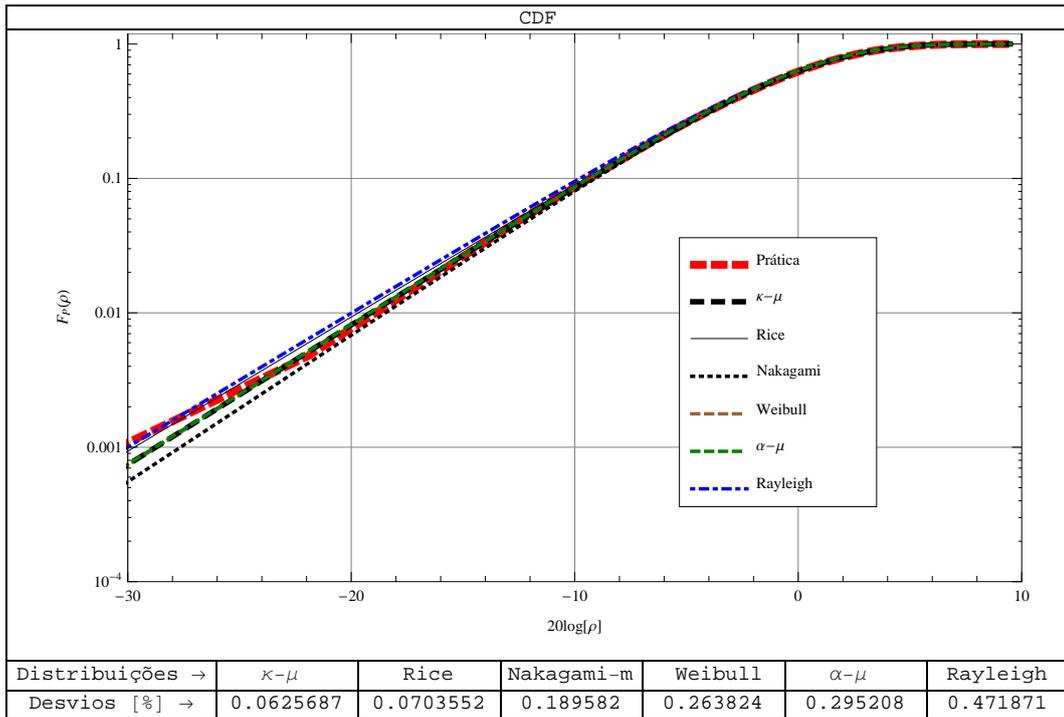


Figura 4.32: Desvios entre a curva prática e as curvas teóricas.

No caso da autocorrelação, a análise da Figura 4.33 revela que, nesta rua, o menor desvio ficou com a distribuição Nakagami- m , seguida da distribuição $\kappa-\mu$.

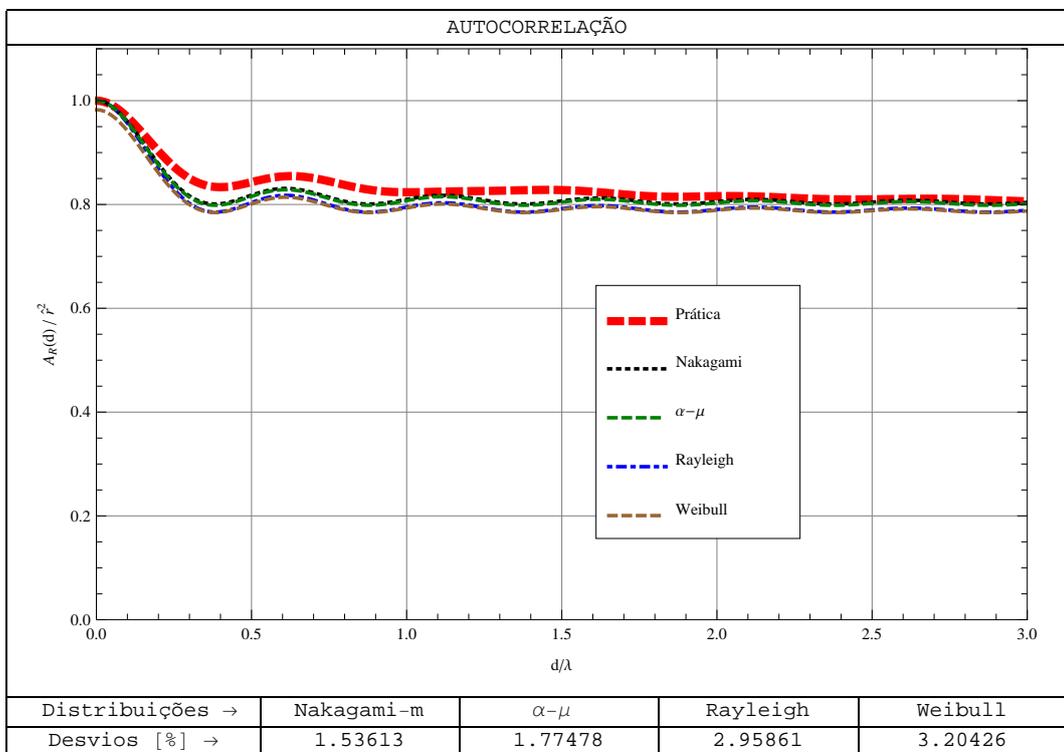


Figura 4.33: Desvios entre a curva prática e as curvas teóricas.

4.3.10 Trajeto 10

Os dados aqui tratados foram obtidos na Rua Dr. Shigeo Mori. A Figura 4.34 mostra uma foto de um trecho dessa rua, por onde passou o aparato de medições.



Figura 4.34: Rua Dr. Shigeo Mori.

Neste trajeto foram coletados dois arquivos de dados, dos quais selecionamos um que, após processamento, apresentou os parâmetros de desvanecimento listados na Tabela 4.11.

Tabela 4.11: Parâmetros de desvanecimento calculados.

Rice	Nakagami- m	Weibul	κ - μ		α - μ	
k	m	α_w	κ	μ	α	μ
0.541451	1.14075	2.11434	0.539611	1.00062	2.27752	0.883936

As Figuras 4.35 e 4.36, mostram que tanto para a PDF quanto para a CDF as distribuições que tiveram os menores desvios foram κ - μ e Rice, distribuições que, além do multipercurso contemplam também uma onda de intensidade superior às demais no interior de cada *cluster*.

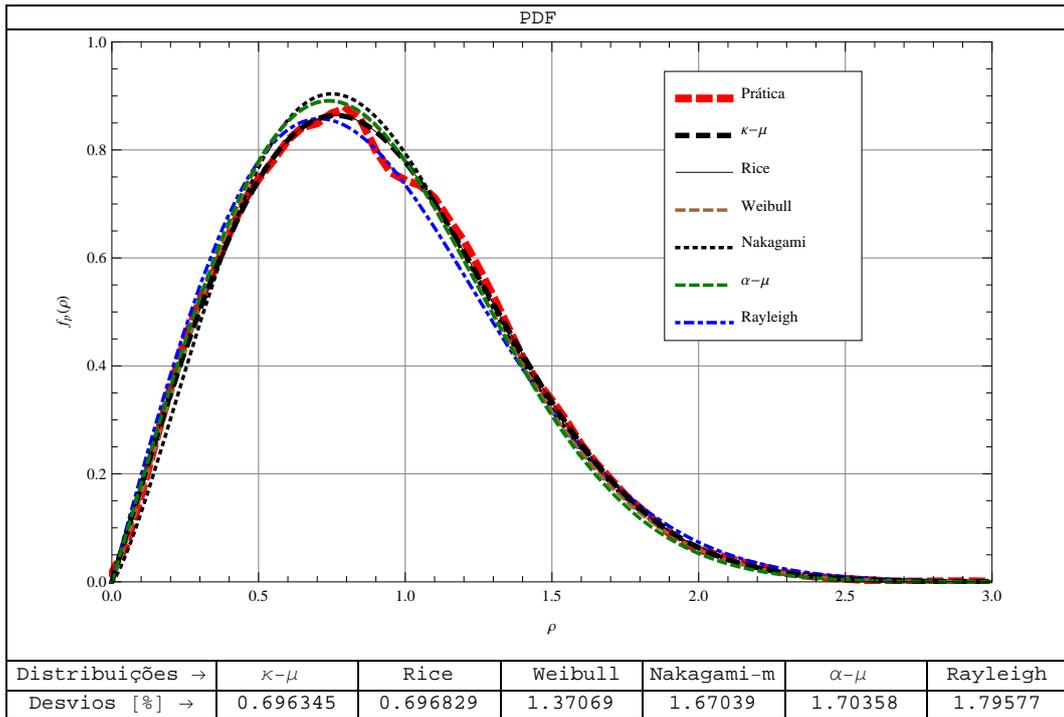


Figura 4.35: Desvios entre a curva prática e as curvas teóricas.

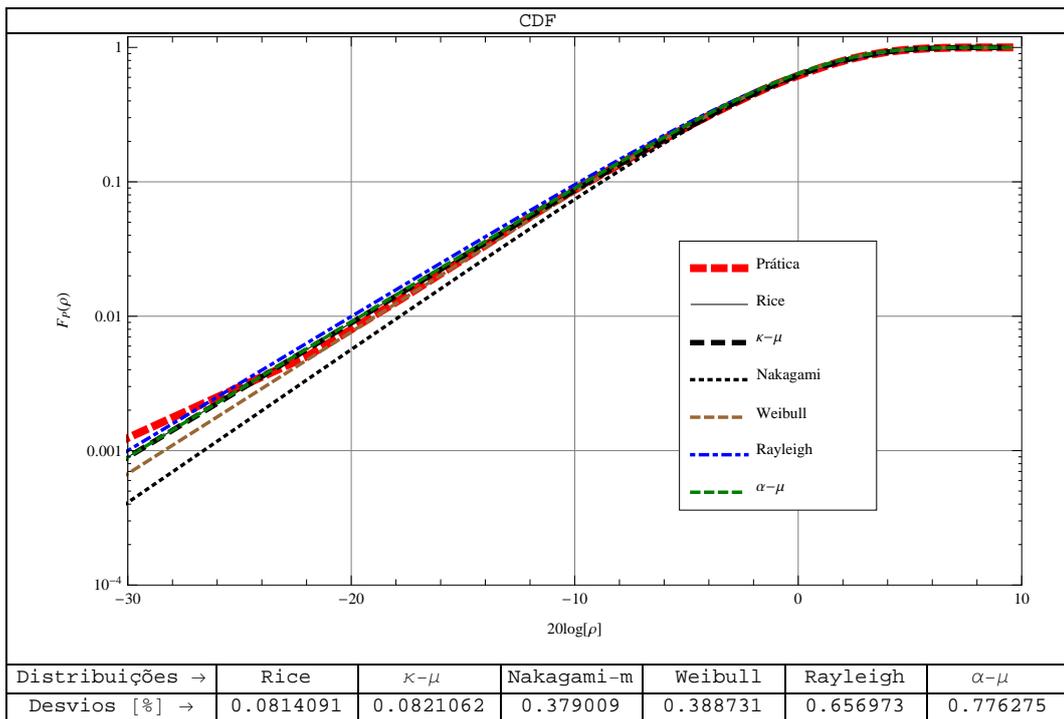


Figura 4.36: Desvios entre a curva prática e as curvas teóricas.

Para a autocorrelação, a análise da Figura 4.33 revela, novamente, que, nesta rua, o menor desvio ficou com a distribuição Nakagami- m , seguida da distribuição $\kappa-\mu$.

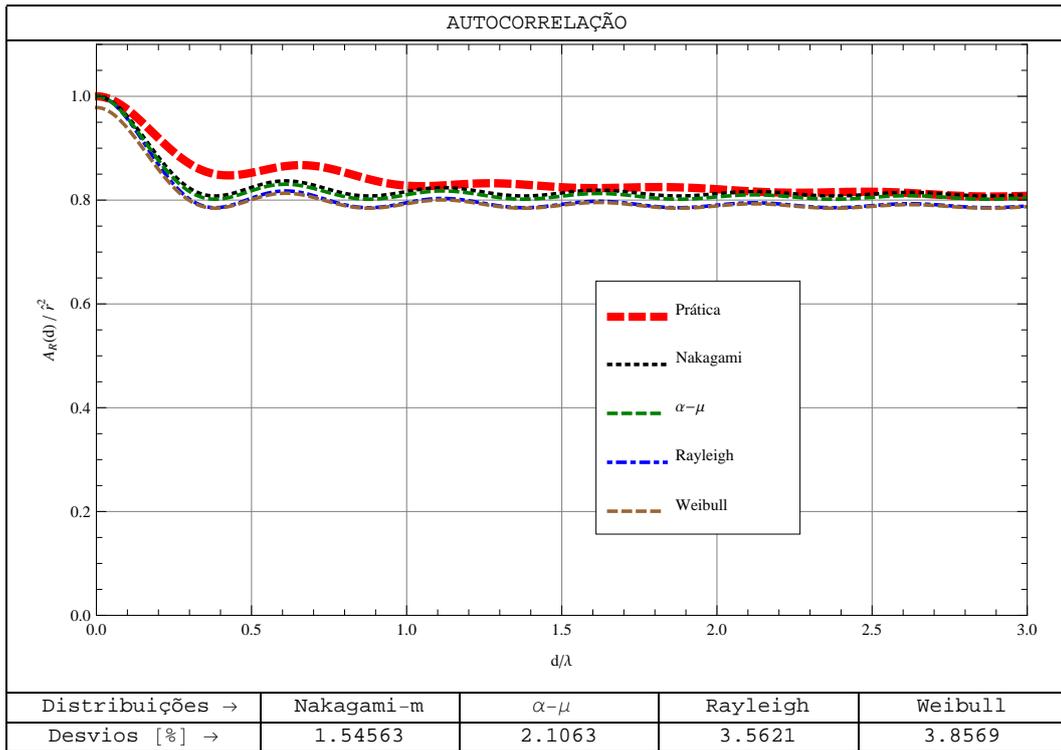


Figura 4.37: Desvios entre a curva prática e as curvas teóricas.

4.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Analisando os resultados apresentados neste capítulo, verificamos que, devido aos tipos de ambientes percorridos nas campanhas de medição, predominaram, com larga margem de vantagem, nas métricas de primeira ordem (PDF e CDF), as duas distribuições que contemplam, além do multipercurso, o raio direto. Ou seja Rice e $\kappa-\mu$, com destacada vantagem para a primeira. Estes resultados estão de pleno acordo com a situação encontrada em campo, onde, em muitos trechos, a linha de visada não era obstruída.

Na Tabela 4.12 pode-se conferir o desempenho de cada distribuição. As marcas X representam os arquivos de medidas em que cada distribuição teve o menor desvio, em relação às curvas empíricas, para PDF e CDF. A coluna ‘ARQ.’ mostra o número do arquivo estudado.

Tabela 4.12: Menores desvios das curvas teóricas em relação às empíricas.

RUA	ARQ.	RAYLEIGH		RICE		NAKAGAMI- m		WEIBULL		$\kappa-\mu$		$\alpha-\mu$	
		PDF	CDF	PDF	CDF	PDF	CDF	PDF	CDF	PDF	CDF	PDF	CDF
Atílio (1)	1					X	X						
	2			X	X								
	3			X	X								
	4									X	X		
Atílio (2)	1				X			X					
	2							X	X				
	3			X	X								
	4			X			X						
Antônio	1				X			X					
	2					X	X						
	3				X			X					
Cora	1									X	X		
	2			X	X								
	3			X	X								
	4			X	X								
	5			X	X								
	6			X	X								
Bertrand	1									X	X		
	2			X							X		
Elis	1			X	X								
	2			X	X								
	3			X									X
	4									X	X		
	5					X	X						
Luverci	1									X	X		
	2			X	X								
	3			X	X								
Ruberlei	1			X	X								
	2									X	X		
	3			X	X								
Holanda	1	X									X		
	2									X	X		
Shigeo	1				X					X			
	2										X	X	
TOTAIS	34	1	0	17	18	3	4	4	1	8	10	1	1
Percentuais PDF		2,94		50,00		8,82		11,76		23,53		2,94	
Percentuais CDF			0,00		52,94		11,76		2,94		29,41		2,94

Na linha intitulada ‘TOTAIS’ é feita a soma do número de arquivos de dados trabalhados e o número de vezes em que a PDF ou a CDF, de cada distribuição, teve o menor desvio em relação às curvas práticas. A linha designada por ‘Percentual PDF’ mostra quanto o total da coluna representa, em termos percentuais, em relação ao número total de arqui-

vos de medidas estudados. Na linha ‘Percentual CDF’ mostramos quanto o total da coluna representa, em termos percentuais, em relação ao número total de arquivos de medidas estudados. Observe-se que a Distribuição Rice se mostrou mais precisa em 50,00% dos casos na PDF e em 52,94% dos casos para a CDF. Em segundo lugar ficou a Distribuição $\kappa-\mu$, com 23,53% e 29,41% dos casos, respectivamente. Em contrapartida, os maiores desvios ficaram com as distribuições Rayleigh e $\alpha-\mu$ que obtiveram bons ajustes em apenas 2,94%/0,00% e 2,94%/2,94% dos casos estudados, respectivamente. Esse resultado é coerente, tendo em vista que os melhores ajustes ficaram com as Distribuições Rice e $\kappa-\mu$, pela presença de raio direto e multipercurso nos ambientes estudados.

Tabela 4.13: Menores desvios para a autocorrelação.

RUA	ARQ.	RAYLEIGH	NAKAGAMI- m	WEIBULL	$\alpha-\mu$
Atílio (1)	1		X		
	2				X
	3		X		
	4		X		
Atílio (2)	1		X		
	2				X
	3		X		
	4				X
Antônio	1		X		
	2				X
	3		X		
Cora	1		X		
	2		X		
	3		X		
	4		X		
	5		X		
	6		X		
Bertrand	1		X		
	2		X		
Elis	1		X		
	2		X		
	3		X		
	4		X		
	5				X
Luverci	1		X		
	2		X		
	3		X		
Ruberlei	1		X		
	2		X		
	3		X		
Holanda	1		X		
	2		X		
Shigeo	1		X		
	2		X		
TOTAIS	34	0	29	0	5
Percentuais		0,00	85,29	0,00	14,71

Na Tabela 4.13 apresentamos o desempenho das distribuições de Rayleigh, Nakagami- m , Weibull e α - μ sob o ponto de vista de uma métrica de segunda ordem, a autocorrelação. Novamente obtivemos resultados coerentes com os demais já comentados. Com a ausência das distribuições Rice e κ - μ , que ainda não possuem expressões fechadas para o cálculo da autocorrelação, a Distribuição Nakagami- m dominou amplamente, tendo apresentado o menor valor de desvio em 85,29% dos casos estudados. A Distribuição α - μ apresentou o menor desvio nos restantes 14,71% dos casos. As distribuições de Rayleigh e Weibull ocuparam, em todos os arquivos estudados, a terceira e a quarta posições, respectivamente. Assim sendo, entendemos que o nosso objetivo de comparar o desempenho de diversas distribuições com resultados de medidas realizadas em campo foi plenamente atingido. Através de gráficos, cálculos e tabelas mostramos o comportamento das distribuições de Rayleigh, Rice, Nakagami- m , Weibull, κ - μ e α - μ diante dos dados disponíveis. E os resultados obtidos se mostraram coerentes com o que era esperado.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 CONCLUSÕES GERAIS

O principal objetivo deste trabalho foi o de comparar o desempenho de diversas distribuições de probabilidades, tradicionais e generalizadas, com dados colhidos em campo. Os resultados dessas comparações foram apresentados no capítulo 4 através da visualização dos desvios das curvas teóricas em relação às empíricas, bem como a quantificação desses desvios através dos cálculos dos seus valores numéricos.

Assim sendo, entendemos que o nosso objetivo de comparar o desempenho de diversas distribuições com resultados de medidas realizadas em campo foi plenamente atingido. Através de gráficos, cálculos e tabelas mostramos o comportamento das distribuições de Rayleigh, Rice, Nakagami- m , Weibull, κ - μ e α - μ diante dos dados disponíveis. E os resultados obtidos se mostraram coerentes com o que era esperado, em função das características físicas dos ambientes onde foram colhidas as amostras dos sinais de RF. Com a presença do multipercurso associado ao raio direto as distribuições de Rice e κ - μ se destacaram sobre as demais de forma significativa, na aproximação com as curvas práticas.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho pode ainda ser complementado, utilizando os mesmos arquivos de medidas, com a inclusão das distribuições estatísticas η - μ e de Hoyt, entre outras, e o estudo de outras métricas de ordem superior, tais como taxa de cruzamento de nível e tempo médio de desvanecimento. No mesmo ambiente, também podem ser avaliadas outras frequências como 2,1 GHz, 2,5 GHz e 3,5 GHz, utilizando-se antena transmissora omnidirecional. A mesma frequência utilizada neste trabalho, 5,5 GHz, pode ser estudada em ambiente *indoor*. Também pode-se repetir o mesmo levantamento utilizado neste trabalho, mas com antena transmissora omnidirecional e comparar os resultados com os aqui apresentados. O campo de estudos do canal rádio-móvel é vasto e a tecnologia disponível avança constantemente, fruto do trabalho incansável dos pesquisadores.

A cada dia novos desafios precisam ser vencidos para que o usuário final possa desfrutar dos avanços tecnológicos com eficiência, qualidade e segurança. E, nesse sentido, toda contribuição é sempre muito bem-vinda.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. D. Yacoub, *Foundations of Mobile Radio Engineering*. Florida: CRC Press, 1993.
- [2] T. Okumura, E. Ohmori, and K. Fukuda, “Field strength and its variability in vhf and uhf land mobile services,” *Review Electrical Communication Laboratory*, vol. 16, no. 9-10, pp. 825–873, 1968.
- [3] M. Hata, “Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. VT-29, no. 3, pp. 317–325, 1980.
- [4] J. P. de Almeida Albuquerque, J. M. P. Fortes, and W. A. Finamore, *Probabilidades, Variáveis Aleatórias e Processos Estocásticos*, PUC-Rio, Ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2008.
- [5] A. Papoulis, *Probability, Random Variables and Stochastic Processes*, 4th ed. Mc Graw-Hill Book, 2002.
- [6] A. L. Garcia, *Probability, Statistics and Random Processes For Electrical Engineering*, 3rd ed. Prentice Hall, Jan 2008.
- [7] U. S. Dias, “Validação de Estatísticas de Ordem Superior para Canais com Desvanecimento Weibull e Nakagami-m,” Master’s thesis, Unicamp, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Agosto 2006.
- [8] M. D. Yacoub, “The κ - μ distribution and the η - μ distribution,” *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 49, no. 1, pp. 68–81, February 2007.
- [9] J. W. S. Lord Rayleigh, *Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. 73, no. 10, 1880.
- [10] S. O. Rice, “Mathematical analysis of random noise,” *Bell System Technical Journal*, vol. 23, pp. 282–332, July 1944.
- [11] M. Nakagami, “The m-Distribution - A General Formula of Intensity Distribution of Rapid Fading,” *Statistical Methods in Radio Wave Propagation*, pp. 3–36, 1960.

- [12] E. H. W. Weibull, “A statistical theory of the strength of materials,” *Royal Swedish Institute for Engineering Research*, vol. 151, 1939.
- [13] M. D. Yacoub, “The α - μ distribution: A general fading distribution,” *Proceedings of the IEEE Int. Symp. PIMRC*, vol. 2, pp. 629–633, Set. 2002.
- [14] J. L. Pawsey, “Further Investigations of the Amplitude Variations of Downcoming Wireless Waves.” *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, vol. 31, pp. 125–144, 1935.
- [15] J. C. S. S. Filho, “Combinação por ganho igual em ambiente com desvanecimento arbitrário,” Master’s thesis, Unicamp, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, 2003.
- [16] J. I. Marcum, “A statistical theory of target detection by pulsed radar: Mathematical appendix,” *Project Rand*, July 1948.
- [17] M. D. Yacoub, J. E. V. Bautista, and L. G. de R. Guedes, “On Higher Order Statistics Of The Nakagami-m Distribution,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 48, no. 3, pp. 790–794, Maio 1999.
- [18] H. B. Tercius, “Distribuições generalizadas de desvanecimento de curto prazo: Medições de campo e validações,” Master’s thesis, Unicamp, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Dezembro 2008.
- [19] M. Abramowitz and I. A. Stegun, *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*. New York: Dover, 1972.
- [20] I. S. Gradshteyn and I. M. Ryzhik, *Table of Integrals, Series, and Products.*, 7th ed. Academic Press, 2007.
- [21] R. A. Fisher and L. H. C. Tippett, “Limiting Forms of the Frequency Distribution of the Largest or Smallest Member of a Sample.” *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, vol. 24, pp. 180–190, 1928.
- [22] U. S. Dias, M. D. Yacoub, G. Fraidenraich, D. B. da Costa, and J. C. S. S. Filho, “On the Weibull Autocorrelation and Power Spectrum Functions: Field Trials and Validation.” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 10, pp. 710–712, Oct. 2006.
- [23] M. D. Yacoub, “The $\alpha - \mu$ Distribution: A Physical Fading Model for the Stacy Distribution,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 56, no. 1, pp. 27–34, Janeiro 2007.

- [24] E. W. Stacy, "A generalization of the Gamma distribution," *Annal. Math. Stat.*, vol. 33, no. 3, pp. 1187–1192, Sep. 1962.
- [25] U. S. Dias and M. D. Yacoub, "On the $\alpha - \mu$ Autocorrelation and Power Spectrum Functions: Field Trials and Validation," in *IEEE Global Communications Conference - Globecom'09*, Honolulu, USA, Nov. - Dec. 2009.

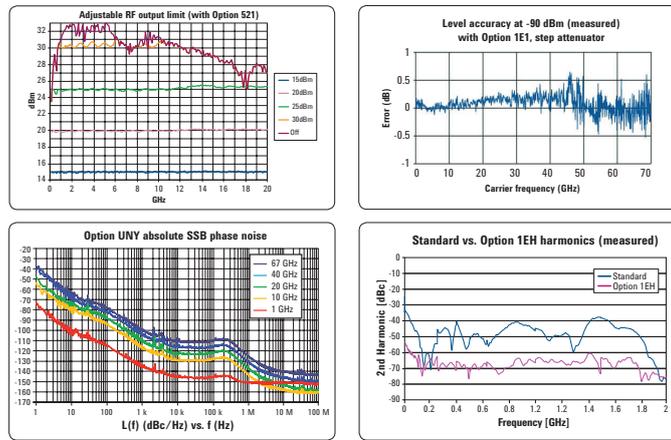
APÊNDICES

A ESPECIFICAÇÕES DA ESTAÇÃO TRANSMISSORA

E8257D PSG Analog Signal Generator

ANALOG
Foundation of
Performance

Delivering power, spectral purity, and wideband analog modulation



Specification summary^{1,2}

Ultra-low phase noise (Option UNY)		Switching speed	
$f_c = 10$ GHz		(list mode)	< 5 ms
(100 Hz offset)	-91 dBc/Hz	Analog modulation (Option UNT)	
(1 kHz offset)	-107 dBc/Hz	AM	
(10 kHz offset)	-126 dBc/Hz	Bandwidth	100 kHz
(100 kHz offset)	-125 dBc/Hz	Depth	
High output power (Option 1EU)		Linear	> 95%
at 20 GHz	+23 dBm	Exponential	> 40 dB
at 30 GHz	+19 dBm	FM	
at 40 GHz	+17 dBm	Bandwidth	dc to 10 MHz
at 50 GHz	+14 dBm	Maximum deviation	
at 67 GHz	+14 dBm	20 GHz < f_c ≤ 40 GHz	64 MHz
67 to 70 GHz	+8 dBm	40 GHz < f_c ≤ 67 GHz	128 MHz
Level accuracy		ΦM	
(CW level = -10 to 0 dBm)		Bandwidth	dc to 1 MHz
$f_c = 2$ to 20 GHz	± 0.8 dB	Maximum deviation	
$f_c = 20$ to 40 GHz	± 0.9 dB	20 GHz < f_c ≤ 40 GHz	64 radians
$f_c = 40$ to 50 GHz	± 0.9 dB	40 GHz < f_c ≤ 67 GHz	1280 radians
$f_c = 50$ to 67 GHz	± 1.0 dB	Narrow pulse modulation (Option UNW)	
		Rise/fall time	6 ns
		Minimum pulse width	20 ns
		On/off ratio	80 dB

1. Numbers in italics indicate typical performance.
2. Specifications subject to change without notice.

Figura A.1: Especificações do Gerador de Sinais usado na estação TX.

1/2" Superflexible Foam Dielectric
FSJ Series - 50-ohm



HELIAX® Coaxial Cables

FSJ4-50B

Description	Type No
Cable Ordering Information	
Standard Superflexible Cable	
1/2" Standard Cable, Standard Jacket	FSJ4-50B
Fire Retardant Cables	
1/2" Fire Retardant Jacket (CATVX)	FSJ4RN-50B
1/2" Fire Retardant Jacket (CATVR)	FSJ4RN-50B
LowVSWR and Specialized Cables	
1/2" Low VSWR, specify operating band	FSJ4P-50(**)
Phase Stabilized and Phase Measured Cable	See page 590
Jumper Cable Assemblies - See page 584	

** Insert suffix number from "Low VSWR Specifications" table, page 487

Characteristics

Electrical	
Impedance, ohms	50 ± 1
Maximum Frequency, GHz	10.2
Velocity, percent	81
Peak Power Rating, kW	15.6
dc Resistance, ohms/1000 ft (1000 m)	
Inner	0.82 (2.69)
Outer	1.00 (3.28)
dc Breakdown, volts	2500
Jacket Spark, volts RMS	5000
Capacitance, pF/ft (m)	25.2 (82.7)
Inductance, µH/ft (m)	0.0625 (0.205)
Mechanical	
Outer Conductor	Copper
Inner Conductor	Copper-Clad Aluminum
Diameter over Jacket, standard jacket, in (mm)	0.52 (13.2)
Diameter over Jacket, fire-retardant jacket, in (mm)	0.53 (13.5)
Diameter over Copper Outer Conductor, in (mm)	0.48 (12.2)
Diameter Inner Conductor, in (mm)	0.142 (3.6)
Minimum Bending Radius, in (mm)	1.25 (32)
Number of Bends, minimum (typical)	20 (50)
Bending Moment, lb-ft (N·m)	2.0 (2.7)
Cable Weight, lb/ft (kg/m)	0.14 (0.21)
Tensile Strength, lb (kg)	175 (80)
Flat Plate Crush Strength, lb/in (kg/mm)	110 (1.9)

Attenuation and Average Power Ratings

Frequency MHz	Attenuation dB/100 ft	Attenuation dB/100 m	Average Power, kW
0.5	0.070	0.231	15.6
1	0.100	0.327	15.6
1.5	0.122	0.401	15.6
2	0.141	0.463	15.6
10	0.318	1.04	10.1
20	0.453	1.49	7.07
30	0.557	1.83	5.75
50	0.724	2.38	4.42
88	0.971	3.19	3.30
100	1.04	3.41	3.08
108	1.08	3.55	2.96
150	1.28	4.21	2.49
174	1.39	4.56	2.30
200	1.50	4.91	2.14
300	1.86	6.09	1.72
400	2.17	7.12	1.48
450	2.31	7.59	1.38
500	2.45	8.04	1.31
512	2.48	8.15	1.29
600	2.71	8.89	1.18
700	2.95	9.68	1.09
800	3.18	10.4	1.01
824	3.23	10.6	0.991
894	3.38	11.1	0.947
960	3.52	11.6	0.909
1000	3.60	11.8	0.889
1250	4.09	13.4	0.783
1500	4.54	14.9	0.705
1700	4.88	16.0	0.656
1900	5.05	16.6	0.634
2000	5.37	17.6	0.597
2100	5.53	18.1	0.580
2200	5.68	18.6	0.564
2300	5.83	19.1	0.549
3000	6.84	22.4	0.469
3400	7.38	24.2	0.435
4000	8.15	26.7	0.394
5000	9.35	30.7	0.343
6000	10.5	34.4	0.306
8000	12.6	41.4	0.254
10000	14.6	47.9	0.220
10200	14.8	48.5	0.217

Standard Conditions:

For attenuation, VSWR 1.0, ambient temperature 20°C (68°F).
For Average Power, VSWR 1.0, ambient temperature 40°C (104°F), inner conductor temperature 100°C (212°F), no solar loading.

Figura A.2: Especificações do cabo coaxial usado na estação TX.



HUBER+SUHNER® PLANAR ANTENNA FOR WIRELESS COMMUNICATION

SPA 5600/40/14/0/V

Technical Data

Electrical Properties

Frequency range	5150 – 5875 MHz
Impedance	50 Ω
VSWR	1.5
Polarization	linear, vertical
Gain	13.5 dBi
3 dB beamwidth horizontal	40°
3 dB beamwidth vertical	35°
Downtilt	0°
Front to back ratio	18 dB
Max. power	80 W (CW) at 50°C

Mechanical & Environmental Properties

Dimensions	101 x 80 x 20 mm (3.97" x 3.15" x 0.79")
Weight	0.13 kg (0.29 lbs.)
Radome material	ASA
Radome colour	RAL 7035 (light grey)
2002/95/EC (RoHS)	compliant
Operating temperature range	-40°C to +80°C
Storage temperature range	-40°C to +80°C
Windload	15 N at 160km/h (100mph)

Available Types

Article no.	Article no.	
1356.19.0008	23041808	SMA female
1356.26.0003	23041810	TNC female

Wall and mast mounting bracket (1 metal band) included, mast diameter 40-60 mm (1.57" – 2.36")

Mounting Hardware

Article no.	Article no.	
9091.99.0191	84011560	Optional wall mounting bracket

Documents

01.02.0777	security instruction
01.02.1033	mounting instruction
01.02.1111	mounting instruction (9091.99.0191)



Radiation Pattern

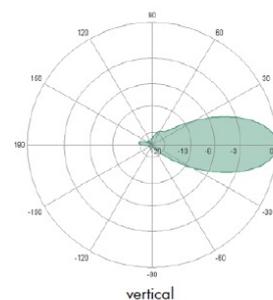
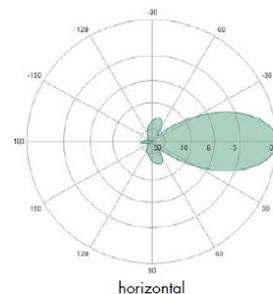


Figura A.3: Especificações da antena transmissora.

HUGHES 1177H SERIES
Instrumentation TWT Amplifiers
1 to 18 GHz, 10 Watts

RF PERFORMANCE

Model	Frequency (GHz)	Gain (dB)	Power Output (Watts)	Connectors
1177H09	1.0-2.0	30	10	Type N female
1177H10	1.4 – 2.4	30	20	Type N female
1177H01	2.0-4.0	30	10	Type N female
1177H05	2.5 – 4.0	30	20	Type N female
1177H13	3.0-8.0	30	10	Type N female
1177H02	4.0-8.0	30	10	Type N female
1177H06	4.0-10.5	30	10	Type N female
1177H07	6.0-13.5	30	10	Type N female
1177H03	8.0-12.4	30	10	Type N female
1177H04	12.4-18	30	10	WR-62
1177H15	8.0-18	30	10	N/WRD650

ELECTRICAL

Gain at rated power output	30 dB min.
Duty	CW
Input Voltage	120 VAC ± 10%
Input Frequency	50/60 Hz
Power Consumption	350 Watts maximum
RF Impedance	50 Ohms

Mechanical

Size	15.5" L x 16.75" W x 3.5"H
Weight	20 Pounds maximum

ENVIRONMENTAL

Operating Temperature	0 - 50 °C ambient
-----------------------	-------------------

Figura A.4: Especificações do amplificador usado na estação TX.

B ESPECIFICAÇÕES DA ESTAÇÃO RECEPTORA



HUBER+SUHNER® SUCOTEST 18 ASSEMBLY

Part no.: ST-18/SMAm/SMAM/48
Order no.: 84003373

SUCOTEST™
be precise.



Electrical specifications

Impedance 50 Ohms
Operating frequency 18 GHz
Velocity of propagation 77%
Capacitance 87 pF/m (26.5 pF/ft)
Time delay 4.3 ns/m (1.31 ns/ft)
Insulation resistance $> 5 \times 10^3$ M Ω
Dielectric withstand voltage 2'500 V rms
Screening effectiveness > 90 dB

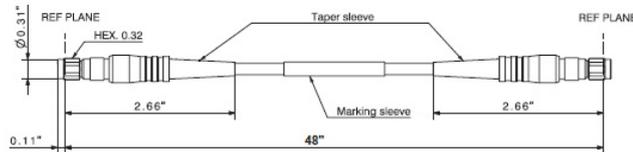
General specifications

Assembly length 1219 mm (48 in.)
Cable diameter 4.6 mm (0.181 in.)
Temperature range -55°C to +105°C
Preferred bending radius 100 mm (4.0 in.)
Connector retention force > 200 N
Recommended mating torque 0.8 Nm... 1.1 Nm
(7.1 ... 9.7 in.lbs)
Connector interface MIL-STD-348A/310
Weight 80 gram

Materials and finishes

Cable jacket FEP, blue
Cable dielectric LDPTFE
Taper sleeves Santoprene / black
Marking sleeve Crosslinked polyolefin/white
Connector contacts Beryllium-copper, gold plated
Connector insulation PTFE
Connector body Stainless steel, passivated
Connector nut Stainless steel, passivated
Gasket Silicon rubber

Dimension



dimensions in inch

Electrical table

		up to 2 GHz	2.01 to 4 GHz	4.01 to 6 GHz	6.01 to 12 GHz	12.01 to 18 GHz
Min. return loss	(dB)	30	28	25	21	19
Max. insertion loss at 25°C	(dB)	< 0.61	< 0.88	< 1.09	< 1.57	< 1.95
Max. cw power at 25°C, sea level	(W)	> 391	> 277	> 225	> 160	> 131
Max. insertion loss vs. shaking	(dB)	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03
Max. insertion loss vs. bending	(dB)	< 0.03	< 0.04	< 0.04	< 0.05	< 0.05
Max. insertion loss vs. torsion	(dB)	< 0.03	< 0.04	< 0.04	< 0.05	< 0.05

Excellence in connectivity solutions

Figura B.1: Especificações do cabo ST-18/SMAm/SMAM/48 usado na estação RX.



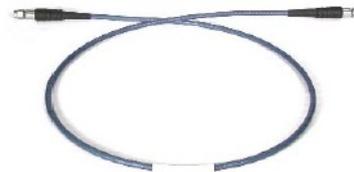
HUBER+SUHNER® SUCOTEST 18 ASSEMBLY

Part no.: ST-18/SMAm/SMAm/72
Order no.: 84004007

SUCOTEST™
be precise.

Electrical specifications

Impedance	50 Ohms
Operating frequency	18 GHz
Velocity of propagation	77%
Capacitance	87 pF/m (26.5 pF/ft)
Time delay	4.3 ns/m (1.31 ns/ft)
Insulation resistance	> 5 × 10 ³ MΩ
Dielectric withstand voltage	2'500 V rms
Screening effectiveness	> 90 dB



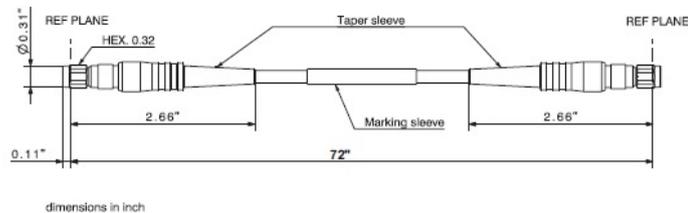
General specifications

Assembly length	1829 mm (72 in.)
Cable diameter	4.6 mm (0.181 in.)
Temperature range	-55°C to +105°C
Preferred bending radius	100 mm (4.0 in.)
Connector retention force	> 200 N
Recommended mating torque	0.8 Nm... 1.1 Nm (7.1 ... 9.7 in.lbs)
Connector interface	MIL-STD-348A/310
Weight	108 gram

Materials and finishes

Cable jacket	FEP, blue
Cable dielectric	LDPTFE
Taper sleeves	Santoprene / black
Marking sleeve	Crosslinked polyolefin/white
Connector contacts	Beryllium-copper, gold plated
Connector insulation	PTFE
Connector body	Stainless steel, passivated
Connector nut	Stainless steel, passivated
Gasket	Silicon rubber

Dimension



Electrical table

		up to 2 GHz	2.01 to 4 GHz	4.01 to 6 GHz	6.01 to 12 GHz	12.01 to 18 GHz
Min. return loss	(dB)	30	28	25	21	19
Max. insertion loss at 25°C	(dB)	< 0.89	< 1.28	< 1.58	< 2.29	< 2.85
Max. cw power at 25°C, sea level	(W)	> 391	> 277	> 225	> 160	> 131
Max. insertion loss vs. shaking	(dB)	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03
Max. insertion loss vs. bending	(dB)	< 0.03	< 0.04	< 0.04	< 0.05	< 0.05
Max. insertion loss vs. torsion	(dB)	< 0.03	< 0.04	< 0.04	< 0.05	< 0.05

Excellence in connectivity solutions

Figura B.2: Especificações do cabo coaxial ST-18/SMAm/SMAm/72 usado na estação RX.

AGILENT 8449B
Microwave Preamp
1 to 26.5 GHz



The Agilent 8449B microwave preamplifier is a high-gain, low-noise preamplifier that provides additional sensitivity for any RF/microwave spectrum analyzer for detection and analysis of very low signals. The improved sensitivity can dramatically reduce measurement time.

Features

- Sensitivity for MIL-STD radiated measurements
- Noise Figure: 1.0-12.5 GHz - 8.5dB; 12.5-22.0 GHz - 12.5dB; 22.0-26.5 GHz - 14.5dB
- Minimum Gain: 23.5dB
- Gain Flatness: 1.0-26.5 GHz - ± 4.5 dB; 2.0-22.0 GHz ± 3.5 dB
- Connector Type: ACP - 3.5 male

Figura B.3: Especificações do LNA.

Product specs for Agilent Technologies E4408B



Product Description:

Agilent Technologies E4408B ESA-L 9kHz-26.5GHz Spectrum Analyzer

The Agilent Technologies E4408B spectrum analyzer is a wide band, very sensitive receiver. It works on the principle of "super-heterodyne receiver" to convert higher frequencies (normally ranging up to several 10s of GHz) to measurable quantities. The received frequency spectrum is slowly swept through a range of pre-selected frequencies, converting the selected frequency to a measurable DC level (usually logarithmic scale), and displaying the same on the CRT of the Agilent Technologies E4408B. The CRT displays received signal strength (y-axis) against frequency (x-axis).

Some applications for Agilent Technologies E4408B Spectrum Analyzers include Site Monitoring: Verify that the frequency and signal strength of your transmitter is accurate. Interference: Before a system is installed you use a Agilent Technologies E4408B spectrum analyzer to verify that the frequencies (you plan to use) are not occupied or if the presence of a very strong signal will interfere with your new setup. Interference can be created by a number of different situations. Other tests that utilize the Agilent Technologies E4408B spectrum analyzer features include antenna isolation, co-channel interference, adjacent channel power, occupied bandwidth, intermodulation, microwave or satellite antenna alignment, and characterization of components.

Performance Characteristics of the E4408B

Form Factor	Benchtop
Input Impedance	50 Ohm
Minimum Frequency	9 kHz
Maximum Frequency	26.5 GHz
Frequency Accuracy	0.0000000002 %
Zero Span	Yes
Minimum Span	100 Hz
Maximum Span	26.5 GHz
Minimum Sweep Time	5 ms
Maximum Sweep Time	2000 s
Minimum Resolution Bandwidth	1 kHz
Maximum Resolution Bandwidth	5 MHz
Resolution Bandwidth Steps	1/3/10
Minimum Video Bandwidth	30 Hz
Maximum Video Bandwidth	1 MHz
Video Bandwidth Steps	1/3/10
Minimum Single-Side-Band Noise	-112 dBc/Hz
Maximum Single-Side-Band Noise	-90 dBc/Hz
Maximum Safe AC Input	30 dBm
Minimum Displayed Average Noise	-116 dBm
Maximum Displayed Average Noise	-101 dBm
Maximum Dynamic Range	78 dB
Maximum Amplitude Uncertainty	3.6666E-02 %
Trigger Source	External,Internal
Trigger Modes	Freerun,TTL
Demodulation	AM
Connector type (main signal)	Type-N(f)
Probe Power	Yes
oise Source Driver	No

Figura B.4: Especificações do analisador de espectro usado na estação RX.