

Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

Validação de Estatísticas de Ordem Superior para Canais com Desvanecimento Weibull e Nakagami-*m*

Autor: Ugo Silva Dias

Orientador: Prof. Dr. Michel Daoud Yacoub

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Banca Examinadora

Membro1, Prof. Dr. Michel Daoud Yacoub DECOM/FEEC/Unicamp
Membro2, Prof. Dr. Dalton Soares Arantes DECOM/FEEC/Unicamp
Membro3, Prof. Dr. Rui Fragassi Souza DMO/FEEC/Unicamp
Membro4, Prof. Dr. João Crisóstomo Weyl A. Costa DEEC/CT/UFPa

Campinas, SP

Agosto/2006

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

D543v	Dias, Ugo Silva Validação de estatística de ordem superior para canais com desvanecimento Weibull e Nakagami-m. – Campinas, SP: [s.n.], 2006. Orientador: Michel Daoud Yacoub. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. 1. Medidas de rádio. 2. Correlação (estatística). 3. Radio – Transmissores e Transmissão – Desvanecimento. 4. Sistemas de comunicação sem fio. 5. Comunicações Digitais. 6. Telecomunicações. I Yacoub, Michel Daoud. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.
-------	---

Resumo

Esta dissertação analisa e valida, através de medidas de campo, estatísticas de ordem superior para canais com desvanecimento Weibull e Nakagami- m . Considerando canais com desvanecimento Weibull, devido à ausência de um modelo físico, estatísticas conjuntas de duas variáveis Weibull correlacionadas foram obtidas em forma fechada e em função de parâmetros físicos bem conhecidos, se destacando as funções de autocorrelação e espectro de potência. Analisando canais com desvanecimento Nakagami- m , expressões simples e em forma fechada para as funções de autocorrelação e espectro de potência foram derivadas. Medidas de campo *indoor* e *outdoor* foram realizadas por meio de um sistema montado e configurado especialmente para investigar as estatísticas em estudo. Foram observados excelentes ajustes entre os dados teóricos e experimentais. Os resultados das medições validam as funções de autocorrelação e espectro de potência para envoltórias Weibull e Nakagami- m .

Palavras-chave: Canais correlacionados; desvanecimento Nakagami- m ; desvanecimento Weibull; espectro de potência; função de autocorrelação; medidas de campo; validação.

Abstract

This dissertation analyzes and validates, through field trials, higher order statistics for Weibull and Nakagami- m fading channels. Concerning Weibull fading channels, due to the absence of a physical model related to such channels, joint statistics for two correlated Weibull variables were obtained in closed-form and in terms of well-known physical parameters, in particular the autocorrelation and power spectrum functions. Concerning Nakagami- m fading channels, simple and closed-form expressions for autocorrelation and power spectrum functions were derived. Indoor and outdoor field trial measurements were conducted in order to investigate these statistics. The mobile reception equipment was especially assembled for this purpose. Excellent fits between analytical and empirical metrics were observed. The measurements results validate the autocorrelation and power spectrum functions of the Weibull and Nakagami- m fading channels.

Keywords: Correlated channels; Nakagami- m fading; Weibull fading; power spectrum; autocorrelation function; field trials; validation.

Aos meus queridos pais: Gorethe e Ubajara.

Aos meus irmãos: Mayara, Diego e Paloma.

À minha namorada e companheira: Débora.

Agradecimentos

Ao Prof. Michel Daoud Yacoub, pela amigável, competente e dedicada orientação.

Aos amigos do laboratório WissTek, em especial ao Gustavo, Daniel, Cândido, Álvaro, Yusef, José Ricardo, Fábio, Hermano, pela ajuda e contribuição nas horas de trabalho. O companheirismo, a dedicação, a determinação e a eficácia da produção científica dos membros do WissTek me fazem sentir orgulho de pertencer a este laboratório.

Aos colegas do laboratório OptNet, pela amizade e pelo apoio durante esses anos. Em especial, agradeço ao Divanilson, Gustavo Pavani, Raul, Darli, Márcio e Iguatemi.

Aos colegas e professores do Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado – UFPa que contribuíram na base da minha formação científica.

À CAPES, pelo apoio financeiro.

À Comunidade Católica Casa da Juventude por ser a minha fortaleza de fé e espiritualidade em busca da santidade. Agradeço aos meus irmãos que oram por mim e fazem parte desta obra.

À minha namorada Débora, pelo companheirismo em todos esses anos de nossas vidas.

À minha família pelo apoio durante esta jornada. Especialmente aos meus irmãos Mayara, Diego e Paloma que estão sempre ao meu lado, compartilhando todas as minhas conquistas.

Aos meus pais, Gorethe e Ubajara, pelo amor dedicado durante toda a minha vida e por sempre ajudarem a fazer com que meus sonhos se tornem realidade.

Finalmente, a Deus, que pelo seu infinito amor derrama graças em minha vida e me faz morada do seu divino Espírito Santo. Obrigado por sempre estar comigo em todos os momentos.

Sumário

Lista de Figuras	viii
Lista de Símbolos	x
Lista de Siglas	xii
Trabalhos Publicados Pelo Autor	xiii
1 Introdução	1
1.1 O Sinal em Comunicações Sem Fio	1
1.1.1 Perda de Percurso	2
1.1.2 Desvanecimentos lento e rápido	2
1.2 Multipercurso	3
1.3 Estatísticas do canal rádio-móvel	4
1.4 Proposta de trabalho	4
1.5 Estrutura da Dissertação	5
2 Modelagem Estatística do Canal Rádio-Móvel	7
2.1 Distribuição de Weibull	7
2.1.1 Estatísticas Conjuntas de Duas Variáveis Weibull Correlacionadas	8
2.1.2 Função Densidade de Probabilidade Conjunta	10
2.1.3 Momentos Conjuntos Generalizados	11
2.1.4 Coeficiente de Correlação Generalizado	11
2.1.5 Alguns aspectos relacionados ao coeficiente de correlação	12
2.1.6 Autocorrelação	13
2.1.7 Estimador do parâmetro α	13
2.1.8 Espectro de Potência da Envoltória Weibull	14
2.1.9 Resultados Numéricos	15
2.2 Distribuição de Nakagami- m	17
2.2.1 Autocorrelação	17
2.2.2 Espectro de Potência da Envoltória Nakagami- m	18
2.2.3 Resultados Numéricos	19
2.3 Conclusões	20

3	Sistema de Medição	22
3.1	Transmissor	22
3.2	Receptor	23
3.2.1	Amostrador espacial	24
3.2.2	Medidor do sinal	27
3.2.3	Adquiridor de dados	29
3.2.4	Fornecedor de Energia	32
4	Medidas de Campo e Validações	33
4.1	Medidas de Campo	33
4.2	Ambientes das Medições	36
4.2.1	<i>Indoor</i>	36
4.2.2	<i>Outdoor</i>	36
4.3	Técnica de Medição	37
4.4	Validações	38
4.5	Conclusões	46
5	Considerações Finais	47
5.1	Investigações Futuras	48
	Referências bibliográficas	49
A	Especificações Técnicas	52
B	Pós-processamento do sinal – Código-fonte do programa	54

Lista de Figuras

2.1	FDP marginal da envoltória normalizada de Weibull.	9
2.2	Desvio das funções exata e aproximada da autocorrelação de Weibull para $d = 0$. . .	15
2.3	Função de autocorrelação de Weibull (exata: sólida; aproximada: pontilhada). . . .	16
2.4	Espectro de potência da envoltória Weibull (exato: sólido; aproximado: pontilhado). .	16
2.5	Configuração de antenas.	17
2.6	Desvio das funções exata e aproximada de autocorrelação Nakagami- m para $d = 0$. .	19
2.7	Função de autocorrelação de Nakagami- m (exata: sólida; aproximada: pontilhada). .	20
2.8	Espectro de potência da envoltória Nakagami- m (exato: sólido; aproximado: ponti- lhado).	21
3.1	Diagrama de blocos do transmissor.	23
3.2	Diagrama de blocos do equipamento de aquisição de dados.	23
3.3	Detalhe do amostrador espacial (roda dentada + circuito).	24
3.4	Placa de aquisição de dados.	30
3.5	Interface do programa com o usuário.	31
4.1	Diagrama da configuração do transmissor.	34
4.2	Vista da cobertura do prédio E da FEEC.	34
4.3	Prédio da Pós-graduação da FEEC.	36
4.4	Prédio de salas de aula da FEC.	37
4.5	Vista lateral do ginásio de esportes.	37
4.6	Mapa da Universidade Estadual de Campinas.	41
4.7	Local: Rua Carlos Chagas.	42
4.8	Local: Rua Carlos Gomes.	42
4.9	Local: Quadra do Ginásio (n.27).	42
4.10	Local: Rua Carlos Chagas.	42
4.11	Local: Rua Carlos Gomes.	42
4.12	Local: Quadra do Ginásio (n.27).	42
4.13	Local: Corredor 2o andar - CPG/FEEC (n.47).	43
4.14	Local: Rua dos Flamboyants.	43
4.15	Local: Prédio DEMIC (n.48).	43
4.16	Local: Corredor 2o andar - CPG/FEEC (n.47).	43
4.17	Local: Rua dos Flamboyants.	43
4.18	Local: Prédio DEMIC (n.48).	43

4.19	Local: Rua Bernardo Sayão.	44
4.20	Local: Rua James C. Maxwell.	44
4.21	Local: Rua Bernardo Sayão.	44
4.22	Local: Rua Bernardo Sayão.	44
4.23	Local: Rua James C. Maxwell.	44
4.24	Local: Rua Bernardo Sayão.	44
4.25	Local: Estacionamento do Banespa (n.51).	45
4.26	Local: Estacionamento do Banespa (n.51).	45
4.27	Local: Estacionamento do Banespa.	45
4.28	Local: Estacionamento do Banespa (n.51).	45
4.29	Local: Estacionamento do Banespa (n.51).	45
4.30	Local: Estacionamento do Banespa.	45
A.1	EADMEC.	53

Lista de Símbolos

M	- Número de ramos de diversidade
$F_A(\cdot)$	- FDC de uma variável aleatória A
$f_A(\cdot)$	- FDP de uma variável aleatória A
$f_{A_1, A_2, \dots, A_n}(\cdot, \cdot, \dots, \cdot)$	- FDP conjunta das variáveis aleatórias $A_1, A_2, \dots, A_n$
$f_{A A_1, \dots, A_n}(\cdot \cdot, \dots, \cdot)$	- FDP condicional de A dado $A_1, A_2, \dots, A_n$
$Pr(\cdot)$	- Probabilidade de um evento
m	- Parâmetro de desvanecimento de Nakagami- m
α	- Parâmetro de desvanecimento de Weibull
α_i	- Parâmetro de desvanecimento de Weibull do i -ésimo ramo
X	- Componente em fase do sinal
Y	- Componente em quadratura do sinal
$\dot{A}$	- Derivada temporal de uma variável aleatória A
X_i	- Componente em fase do sinal no i -ésimo ramo
Y_i	- Componente em quadratura do sinal no i -ésimo ramo
$E(\cdot)$	- Média de uma variável aleatória
$Var(\cdot)$	- Variância de uma variável aleatória
$Cov(\cdot)$	- Operador covariância
R_W	- Envoltória de Weibull
R_i	- Envoltória de Weibull do i -ésimo ramo
R_R	- Envoltória de Rayleigh
R_{Ri}	- Envoltória de Rayleigh do i -ésimo ramo
R_N	- Envoltória de Nakagami- m
$\hat{r}$	- Raiz α -ésima de R^α
$\hat{r}_i$	- Raiz α_i -ésima de $R_i^{\alpha_i}$
P	- Envoltória normalizada do sinal Weibull com relação a $\hat{r}$
P_i	- Envoltória normalizada do sinal Weibull com relação a $\hat{r}_i$
Ω	- Valor médio de R_W^α ou de R_R^2
Ω_i	- Valor médio de $R_i^{\alpha_i}$
ρ_i	- Envoltória normalizada com relação ao valor rms
P_i	- Potência média do sinal Weibull no i -ésimo ramo
δ	- Parâmetro de correlação
$\delta_{p,q}$	- Coeficiente de correlação generalizado das envoltórias de Weibull
$\delta_{p,q}^R$	- Coeficiente de correlação generalizado das envoltórias de Rayleigh
$ \cdot $	- Operador determinante
J	- Jacobiano de uma transformação de variáveis

G_i	-	Processo gaussiano do i -ésimo sinal
$D(\phi)$	-	Diretividade horizontal
ϕ	-	Ângulo da potência incidente
ω_D	-	Desvio Doppler máximo em rad/s
f_m	-	Desvio Doppler máximo em Hz
τ	-	Diferença de tempo entre dois sinais desvanecidos
$\Delta\omega$	-	Diferença de frequência entre dois sinais
T	-	Atraso no tempo
$\bar{T}$	-	Espalhamento do atraso (<i>delay spread</i>)
λ	-	Comprimento de onda da portadora
d	-	Espaçamento entre as antenas
θ	-	Ângulo entre o eixo das antenas e a direção de movimento do veículo
A_{RW}	-	Função de Autocorrelação da envoltória Weibull
A_{RN}	-	Função de Autocorrelação da envoltória Nakagami- m
$\hat{A}_{RW}$	-	Função de Autocorrelação aproximada da envoltória Weibull
$\hat{A}_{RN}$	-	Função de Autocorrelação aproximada da envoltória Nakagami- m
$\hat{A}_R$	-	Autocorrelação empírica da envoltória
S_{RW}	-	Espectro de Potência da envoltória Weibull
S_{RN}	-	Função de Autocorrelação da envoltória Nakagami- m
$\tilde{S}_{RW}$	-	Espectro de Potência aproximado da envoltória Weibull
$\tilde{S}_{RN}$	-	Função de Autocorrelação aproximado da envoltória Nakagami- m
d_d	-	Distância entre dentes da roda
n	-	Número de dentes
n_{min}	-	Número mínimo de amostras
n_{max}	-	Número máximo de amostras
f_p	-	Frequência de passagem dos dentes
f_{aq}	-	Frequência de aquisição
ϵ	-	Erro médio absoluto

Lista de Siglas

FDP	- Função Densidade de Probabilidade
FDC	- Função de Distribuição Cumulativa
FCC	- Função de correlação cruzada
EADMEC	- Equipamento de aquisição de dados modular espacialmente controlado
TX	- Transmissor
RX	- Receptor
DC	- Corrente contínua
VDC	- Voltagem corrente contínua
AC	- Corrente alternada
VAC	- Voltagem corrente alternada
LED	- Diodo emissor de luz
TTL	- Lógica Transistor-Transistor
USB	- Barramento Serial Universal
RF	- Rádio Frequência
CW	- Onda Contínua
LNA	- Amplificador de baixo ruído
BW	- Largura de faixa
VBW	- Largura de faixa de vídeo
ERP	- Potência efetivamente radiada
FFT	- Transformada rápida de Fourier
DFT	- Transformada discreta de Fourier
UNICAMP	- Universidade Estadual de Campinas
FEEC	- Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação
FEC	- Faculdade de Engenharia Civil
DEMIC	- Departamento de Microeletrônica
DECOM	- Departamento de Comunicações

Trabalhos Publicados Pelo Autor

1. U. S. Dias, M. D. Yacoub, G. Fraidenraich, D. B. da Costa, and J. C. S. Santos Filho. “On the Weibull Autocorrelation and Power Spectrum Functions: Field Trials and Validation”. *IEEE Communications Letters*, vol. 10, no.10, October 2006.
2. U. S. Dias, M. D. Yacoub, J. C. S. Santos Filho, G. Fraidenraich, and D. B. da Costa. “On the Nakagami- m Autocorrelation and Power Spectrum Functions: Field Trials and Validation”. *International Telecommunications Symposium (ITS’2006)*, Fortaleza, CE, Brasil, September 2006.
3. M. D. Yacoub, D. B. da Costa, U. S. Dias, and G. Fraidenraich. “Joint Statistics for Two Correlated Weibull Variates”. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 4, pp. 129-132, 2005.
4. U. S. Dias, G. Fraidenraich, and M. D. Yacoub. “On the Weibull Autocorrelation Function: Field Trials and Validation”. *IEEE International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC’2005)*, Brasília, DF, Brasil, Julho 2005.
5. J. C. S. Santos Filho, G. Fraidenraich, U. S. Dias, and M. D. Yacoub. “On the Nakagami- m Crosscorrelation Function”. *IEEE International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC’2005)*, Brasília, DF, Brasil, Julho 2005.
6. U. S. Dias, M. D. Yacoub, and G. Fraidenraich. “On the Weibull Autocorrelation and Power Spectrum Functions: Field Trials and Validation”. *XXII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBrT’05)*, Campinas, SP, Brasil, Setembro 2005.

Capítulo 1

Introdução

A mobilidade garantiu aos sistemas de comunicação sem fio um nicho privilegiado no mercado mundial das telecomunicações e um crescimento vertiginoso nos últimos tempos. As novas gerações de sistemas trazem propostas ousadas, com altas taxas de transmissão integrando voz, dados e imagem. Em vista do acelerado avanço tecnológico, vislumbra-se uma rede sem fio global, provendo as mais remotas localidades de uma ampla gama de serviços, com total flexibilidade e transparência para os diversos tipos de usuários.

A performance dos sistemas sem fio é duramente penalizada pela natureza inconstante do canal rádio-móvel. Dentre as penas, o desvanecimento e o multipercurso são das mais severas. Uma caracterização precisa da variabilidade do sinal nos diversos tipos de ambientes é extremamente complexa. Métodos determinísticos, como aqueles descritos pelos modelos de espaço livre, terreno plano e difração por gume de faca, são muito restritos. O estudo de técnicas que contornem os efeitos aleatórios do sinal de rádio é, portanto, crucial no projeto de sistemas de comunicação sem fio.

1.1 O Sinal em Comunicações Sem Fio

A comunicação sem fio inicia-se com uma mensagem, convertida em sinal eletrônico por um equipamento transmissor. Este utiliza um oscilador para gerar ondas de rádio. O transmissor modula a onda de rádio para que esta carregue o sinal eletrônico e envia o sinal de rádio modificado através do espaço, onde é captado por um receptor. O receptor decodifica, ou demodula, a onda de rádio e exibe a mensagem decodificada. É de conhecimento de todos que a comunicação sem fio proporciona maior flexibilidade do que os meios de comunicação baseados em cabos; contudo, há algumas desvantagens.

A propagação do sinal no canal rádio-móvel está sujeita à combinação de três fenômenos que o degradam: perda de percurso em grande escala, desvanecimento de longo prazo ou lento e desvanecimento de curto prazo ou rápido.

1.1.1 Perda de Percurso

A perda de percurso em grande escala é causada pela atenuação do sinal ao longo do percurso entre transmissor e receptor. Esse enfraquecimento efetivo da intensidade do sinal é resultado de um grande número de fatores, tais como as características do sistema radiante, ambiente de propagação, frequência de operação, distância entre transmissor e receptor, entre outros. As variações e atenuações em grande escala são observáveis através de grandes distâncias (dezenas de metros) e, tipicamente, são modeladas como variáveis aleatórias em ambientes com obstáculos.

1.1.2 Desvanecimentos lento e rápido

O desvanecimento lento está relacionado às características de propagação que manifestam seus efeitos no sinal ao longo de médias e grandes distâncias, comparadas com o comprimento de onda. Mesmo sem movimentação do receptor, o desvanecimento lento pode ocorrer devido a alterações significativas no ambiente como, por exemplo, variações temporais no índice de refração da atmosfera. Esse tipo de desvanecimento é também conhecido por sombreamento, pois ele está relacionado a obstruções naturais (relevo e vegetação) e a construções, como casas e edifícios, que fazem com que o móvel fique em uma região de sombra eletromagnética (ou de nível de sinal reduzido). O desvanecimento lento determina a variação da média global do sinal recebido e ocorre em intervalos de dezenas de comprimento de onda.

O desvanecimento rápido é causado pelo comportamento aleatório das componentes que chegam ao receptor, verificado em curtas distâncias ou em pequenos intervalos de tempo. Tal comportamento é resultado da multiplicidade de percursos originados através de várias componentes que chegam ao receptor com diferentes amplitudes e defasagens entre si. Esse tipo de desvanecimento caracteriza a variação da média local do sinal e ocorre em intervalos de, aproximadamente, meio comprimento de onda.

Dentre os modelos utilizados para a caracterização das flutuações lentas do sinal, o mais utilizado está relacionado à distribuição Lognormal [1], independentemente da distância entre transmissor e receptor [2]. Para flutuações rápidas, os mais utilizados estão relacionados às distribuições de Rayleigh, Hoyt, Rice e Nakagami- m . Entretanto, outro modelo que recentemente tem despertado interesse é o relacionado à distribuição de Weibull. Nesta dissertação apresentaremos algumas estatísticas de ordem superior importantes relacionadas a ambientes de desvanecimento Weibull e Nakagami- m (desvanecimento rápido), dando maior ênfase ao primeiro.

1.2 Multipercurso

Em sistemas de comunicações móveis sem fio, o ambiente onde as comunicações ocorrem e a mobilidade fazem com que o sinal resultante no receptor seja formado pela composição de ondas eletromagnéticas que percorreram diversas trajetórias distintas entre transmissor e receptor, através de diferentes mecanismos de propagação. Além disso, as faixas de frequência escolhidas para tais sistemas (VHF, UHF, SHF, EHF) favorecem a propagação do sinal transmitido através de mecanismos de reflexão, difração, espalhamento e visada direta. Quanto ao ambiente de propagação, nas áreas mais povoadas (principalmente as grandes áreas urbanas), edifícios representam obstáculos nos quais as ondas propagantes podem refletir-se ou difratar-se. Como a unidade móvel está, em geral, imersa neste tipo de ambiente, ela receberá ondas através dos vários mecanismos de propagação gerados por meio deste. A mobilidade da unidade portátil possibilita que, a cada instante, o móvel esteja recebendo uma diferente combinação de ondas propagantes, que esteja ocorrendo em determinados locais e momentos. Os vários raios refletidos, refratados e espalhados nos diversos ambientes são, portanto, os formadores do multipercurso.

Uma análise criteriosa do sinal faz-se necessária a fim de se conhecerem as características do canal. A utilização de modelos determinísticos torna-se extremamente difícil [3] devido à complexidade do fenômeno de multipercurso. Costuma-se, então, caracterizá-lo de forma estatística, ou seja, o sinal recebido é tratado como um processo estocástico.

Quando há um número grande de ondas com multipercurso que contribuem à propagação do sinal, a aplicação do Teorema Central do Limite conduz a um modelo de processo Gaussiano para resposta impulsiva do canal. O módulo desse processo corresponde à envoltória do sinal. Caso o processo tenha variáveis gaussianas de média nula e variâncias iguais, resulta que, a densidade de probabilidade (estatística de primeira ordem do processo estacionário) da envoltória do sinal, em qualquer instante de tempo, segue a distribuição de Rayleigh e a fase é uniformemente distribuída no intervalo $[0, 2\pi]$ [1, 3–5]. Uma maneira de estender a distribuição de Rayleigh é considerar que as componentes em fase e em quadratura em banda base possuem variâncias distintas. Neste caso, a função de densidade de probabilidade segue a distribuição de Hoyt [6]. Outra generalização de Rayleigh é a distribuição de Nakagami- m [7], na qual o sinal que chega ao receptor pode ser modelado como um conjunto de *clusters* de ondas de multipercurso, onde o número de *clusters*, não necessariamente inteiro, representa um parâmetro da distribuição – parâmetro m . A distribuição de Weibull constitui outro caso de generalização de Rayleigh e sua interpretação física será discutida nesta dissertação. Ainda há outras distribuições generalizadas que caracterizam o fenômeno de multipercurso, tais como: η - μ [8, 9], distribuição κ - μ [9, 10] e distribuição α - μ [11, 12]. A distribuição η - μ engloba as distribuições Nakagami- m e Hoyt; a distribuição κ - μ compreende as distribuições Nakagami- m e Rice; e a distribuição α - μ tem como casos particulares as distribuições Nakagami- m e Weibull.

1.3 Estatísticas do canal rádio-móvel

Dentre as estatísticas de primeira ordem, o valor médio, a variância, a função densidade de probabilidade (FDP) e a função de distribuição cumulativa (FDC) podem ser citadas como exemplos. Uma descrição completa de tais estatísticas e de suas respectivas propriedades podem ser encontradas em [13].

Dentre as estatísticas de segunda ordem, temos aquelas relacionadas a derivadas temporais, a autocorrelação e a autocovariância. As funções de autocorrelação e de autocovariância fornecem, respectivamente, a correlação e a covariância entre duas variáveis aleatórias do sinal, a primeira no instante t_1 e na frequência ω_1 e a segunda no instante t_2 e na frequência ω_2 . Para processos estocásticos estacionários (no sentido estrito ou mesmo no sentido amplo), estas funções não dependem dos instantes específicos t_1 e t_2 ou das frequências específicas ω_1 e ω_2 , mas apenas das diferenças $\tau = t_2 - t_1$ e $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$ [13]. Nestes processos, a razão entre a covariância e a variância do processo é definida como coeficiente de correlação. Interpretando fisicamente, o coeficiente de correlação representa um meio de descrever a interdependência entre duas variáveis aleatórias de um processo, observado em instantes separados por τ segundos. Deste modo, processos que variam mais rapidamente com o tempo terão um coeficiente de correlação que decresce rapidamente com o aumento de τ [14]. O mesmo ocorre no domínio da frequência.

A função de autocorrelação da envoltória mostra-se com grande interesse pela sua aplicação e capacidade de descrição das variações espaciais e temporais do canal rádio-móvel. A partir dela pode-se obter de forma direta ou indireta diversos parâmetros importantes, tais como a largura de banda de coerência, tempo médio de desvanecimento, tempo/distância de coerência, taxa de cruzamento de nível e duração média de desvanecimento, entre outros. Com o conhecimentos desses parâmetros pode-se, por exemplo, determinar o comprimento de um *interleaver*, escolher um código corretor de erros apropriado, etc.

Outro parâmetro estatístico de segunda ordem de interesse é o espectro de potência da envoltória. Sua função é obtida a partir da transformada de Fourier da autocorrelação e, no ambiente sem fio, mostra a intensidade do sinal como uma função do deslocamento *Doppler*. O espectro de potência é muito útil quando se deseja estudar as mesmas aplicações da autocorrelação, entretanto, em um domínio diferente.

1.4 Proposta de trabalho

A proposta desta dissertação de mestrado é validar e analisar o comportamento das funções de autocorrelação e espectro de potência das distribuições de Weibull e Nakagami- m através de medidas

de campo. Uma parte significativa da literatura que lida com medidas de campo tem se dedicado ao estudo de estatísticas de primeira ordem dos modelos de Weibull e Nakagami- m . Entretanto, no caso da distribuição de Nakagami- m , poucos trabalhos investigam suas estatísticas de ordem superior e, no caso do processo Weibull, pelo conhecimento do autor, nenhum trabalho na literatura foi realizado com medidas de campo e validações das funções em questão. Desta forma, este trabalho vem preencher essa lacuna e contribuir para a melhoria das técnicas de planejamento dos sistemas de comunicações sem fio.

Para as referidas validações e análises, um sistema de transmissão e um equipamento móvel de aquisição de dados são utilizados e configurados especialmente para este fim. Várias campanhas de medições são realizadas pelo campus da UNICAMP em diversos tipos de ambientes, tais como interiores e exteriores de edificações, ruas arborizadas ou não, com tráfego ausente, ameno e intenso, contando ou não com a presença de pessoas. Após a coleta dos dados de campo, é feito um pós-processamento dos dados obtidos e os resultados são analisados.

As contribuições deste trabalho são:

- Expressões analíticas da autocorrelação e espectro de potência do modelo de desvanecimento Weibull;
- Validação das funções de autocorrelação e espectro de potência das distribuições de Weibull e Nakagami- m ;
- Descrição dos ambientes em que esses modelos de desvanecimento se ajustam melhor;
- Técnicas de medição de campo;

1.5 Estrutura da Dissertação

A dissertação é estruturada da seguinte forma:

- **Capítulo 2** - Apresentação dos modelos de desvanecimento Weibull e Nakagami- m . Devido à ausência de um modelo físico até então para a distribuição de Weibull em ambientes de desvanecimento, este capítulo tem como objetivo apresentar algumas estatísticas conjuntas de duas variáveis Weibull correlacionadas em função de parâmetros físicos de desvanecimento bem conhecidos. Em particular, a FDP conjunta e os momentos conjuntos generalizados são obtidos, e as funções de autocorrelação e espectro de potência são derivadas. Em adição, estas mesmas funções são derivadas para a envoltória Nakagami- m . Este é um capítulo considerado fundamental pois consiste na base teórica da dissertação e que será explorada experimentalmente nos demais capítulos.

- **Capítulo 3** - Apresentação e descrição do sistema de medição, composto pelo transmissor e receptor. Este sistema admite boa versatilidade e foi configurado especialmente para investigar as propriedades estatísticas de ordem superior. O conjunto transmissor-receptor possui características próprias que dão oportunidade de realizar medidas em banda estreita controladas de forma temporal e espacial, em ambientes externos e internos.
- **Capítulo 4** - Medidas de campo são apresentadas e analisadas. A técnica de medição também é descrita. Os resultados validam as expressões teóricas das estatísticas de ordem superior de Weibull e Nakagami- m em estudo. São comentados e avaliados o desempenho de cada um destes modelo de desvanecimento segundo as características de cada ambiente. São discutidas as influências, na prática, dos efeitos de multipercurso, visada direta e desvanecimento rápido.
- **Capítulo 5** - Considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.
- **Apêndice A** - Fornece as especificações técnicas dos componentes utilizados na montagem do equipamento de aquisição de dados, além de fotos do sistema completo.
- **Apêndice B** - Apresenta o código-fonte do programa de computador que é utilizado na etapa de pós-processamento dos sinais medidos. O mesmo é capaz de calcular a média móvel (*moving average*) e filtrar os desvanecimentos lento e rápido.

Capítulo 2

Modelagem Estatística do Canal Rádio-Móvel

O desempenho do canal rádio-móvel sem fio é fortemente afetado pelos fenômenos de desvanecimento de multipercurso. Para minimizar este efeito, é imprescindível um conhecimento profundo das características dos canais de desvanecimento, além de saber modelá-los corretamente.

No capítulo anterior, foram descritos alguns parâmetros que afetam o sinal de rádio frequência. Na análise do assunto não é difícil deduzir que, de fato, um número muito grande de fatores podem influenciar o sinal. Certamente, um único tratamento determinístico deste sinal estará reduzindo o problema a um modelo simplificado demais. Então, pode-se tratar o sinal em uma base estatística e interpretar os resultados como eventos aleatórios que acontecem com uma determinada probabilidade. Para este fim, serão analisadas duas distribuições que possuem relações adequadas às estatísticas de sinais rádio-móveis: Weibull e Nakagami- m .

Neste capítulo descreveremos estas distribuições de probabilidade e destacaremos algumas de suas características mais relevantes. As funções de autocorrelação e espectro de potência da envoltória serão obtidas para cada modelo e suas respectivas validações, por meio de medidas de campo, serão descritas no Capítulo 4.

2.1 Distribuição de Weibull

A distribuição de Weibull é um modelo estatístico que foi originalmente proposto para análise de confiabilidade. Devido à sua flexibilidade e simplicidade, além do excelente ajuste demonstrado na descrição de canais em desvanecimento caracterizado por multipercurso, onde os ambientes de propagação podem ser tanto *indoor* (interno) quanto *outdoor* (externo) [15–18], sua aplicação foi estendida aos sistemas de comunicação sem fio [15–21]. Outros trabalhos recentes mostram aplica-

ções da distribuição de Weibull para canais rádio-móveis. Por exemplo, uma análise para o cálculo do desempenho de um combinador por seleção generalizada sobre canais em desvanecimento Weibull, considerando o comportamento de receptores com diversidade, foi apresentada em [22]; estudos baseados no desempenho da diversidade comutada e por seleção foram feitos em [23] e [24], respectivamente.

Em virtude da sua primária utilização em estudos de confiabilidade e da sua juvenilidade de aplicação em comunicações sem fio, nenhum modelo físico tem sido associado à esta distribuição. Em [11, 12], um modelo físico para uma distribuição de desvanecimento generalizada foi proposta, no qual Weibull aparece como um caso especial. A envoltória resultante é obtida como uma função não-linear do módulo da soma das componentes de multipercurso. Tal não-linearidade é manifestada em termos de um parâmetro de potência, de forma que a intensidade do sinal resultante é obtida não apenas como o módulo da soma das componentes de multipercurso, mas como este módulo elevado a um certo expoente. Apesar das contribuições, o autor, em [11, 12], não explica como a não-linearidade acontece ou se até mesmo ela ocorre. O mesmo conjectura que o efeito resultante do sinal propagado em um certo meio é manifestado em termos de uma não-linearidade. Além do fenômeno relacionado ao meio de propagação, tal não-linearidade pode advir das limitações práticas do processo de detecção no receptor.

Esta seção objetiva apresentar expressões simples e de forma fechada para as estatísticas conjuntas de duas variáveis Weibull correlacionadas. De forma particular, a FPD conjunta e os momentos conjuntos generalizados serão obtidos em termos de parâmetros físicos de desvanecimento bem conhecidos. Serão destacadas, em seguida, duas funções muito importantes para a caracterização do canal rádio-móvel: autocorrelação e espectro de potência da envoltória.

2.1.1 Estatísticas Conjuntas de Duas Variáveis Weibull Correlacionadas

Em concordância com o modelo descrito em [11, 12], a envoltória do sinal resultante de um processo Weibull é um processo não-linear obtido como o módulo da soma das componentes de multipercurso elevado a um certo expoente. Supondo que tal não-linearidade é da forma de um parâmetro de potência $\alpha > 0$, a envoltória resultante R_W é dada por

$$R_W^\alpha = X_i^2 + Y_i^2 \quad (2.1)$$

onde X_i e Y_i são processos Gaussianos mutuamente independentes, com $E(X_i) = E(Y_i) = 0$ e $E(X_i^2) = E(Y_i^2) = \hat{r}^\alpha/2$, onde $E(\cdot)$ denota média estatística. A partir de (2.1), pode ser mostrado que a FDP $f_R(\cdot)$ de R_W é dada por

$$f_{R_W}(r) = \frac{\alpha r^{\alpha-1}}{\hat{r}^\alpha} \exp\left(-\frac{r^\alpha}{\hat{r}^\alpha}\right), \quad (2.2)$$

onde o parâmetro $\hat{r}$ é definido aqui como a raiz α -ésima da média estatística de R_W^α , isto é, $\hat{r} = \sqrt[\alpha]{E(R_W^\alpha)}$. Para uma envoltória normalizada $P = R_W/\hat{r}$, a FDP $f_P(\rho)$ de P , é obtida como

$$f_P(\rho) = \alpha \rho^{\alpha-1} \exp(-\rho^\alpha) \quad (2.3)$$

A Figura 2.1 ilustra a $f_P(\rho)$ para alguns valores de α .

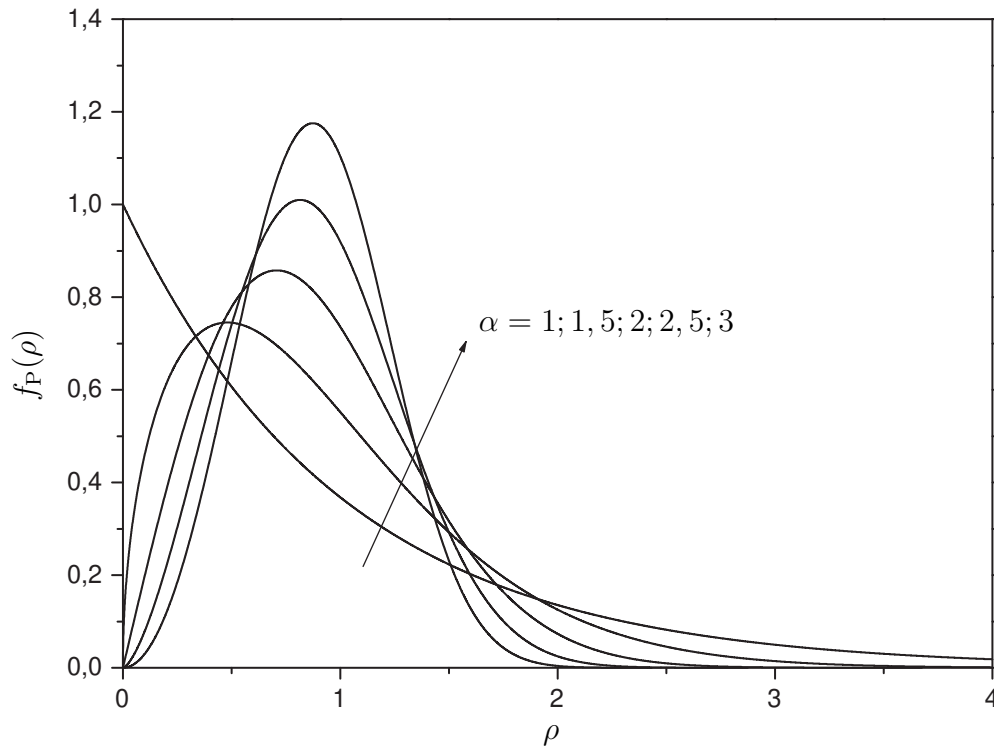


Fig. 2.1: FDP marginal da envoltória normalizada de Weibull.

A FDC $F_{R_W}(\cdot)$ da envoltória Weibull pode ser obtida a partir de sua FDP por meio de $F_{R_W}(r) = \int_{-\infty}^r f_U(u) du$. Logo, a FDC de R_W é dada por

$$F_{R_W}(r) = 1 - \exp\left(-\frac{r^\alpha}{\hat{r}^\alpha}\right) \quad (2.4)$$

Equivalentemente,

$$F_P(\rho) = 1 - \exp(-\rho^\alpha) \quad (2.5)$$

Aplicando os conceitos da teoria de probabilidade, temos que o k -ésimo momento da envoltória normalizada $E(P^k)$ é obtido como

$$E(P^k) = \int_0^\infty \rho^k f_P(\rho) d\rho = \Gamma(1 + k/\alpha), \quad (2.6)$$

onde $\Gamma(z) = \int_0^\infty t^{z-1} \exp(-t) dt$ é a função Gama. Obviamente, $E(R_W^k) = \hat{r}^k E(P^k)$. A partir de (2.1), pode ser visto que

$$R_W^\alpha = R_R^2, \quad (2.7)$$

onde R_R é a envoltória Rayleigh. As estatísticas conjuntas podem agora ser obtidas beneficiando-se de alguns resultados disponíveis na literatura para a distribuição Rayleigh. Mais especificamente, usamos a relação (2.7) entre as variáveis Weibull e Rayleigh. Sejam R_{R1} e R_{R2} duas variáveis Rayleigh cujas estatísticas marginais são, respectivamente, descritas pelos parâmetros $E(R_{R1}^2) = \Omega_1$ e $E(R_{R2}^2) = \Omega_2$; R_{W1} e R_{W2} duas variáveis Weibull cujas estatísticas marginais são respectivamente descritas pelos parâmetros $\alpha_1, \hat{r}_1$; $\alpha_2, \hat{r}_2$ e $0 \leq \delta \leq 1$ um parâmetro de correlação. (Adiaremos a discussão sobre esse parâmetro para as próximas subseções.)

2.1.2 Função Densidade de Probabilidade Conjunta

A FDP conjunta $f_{R_{R1}, R_{R2}}(r_{R1}, r_{R2})$ de duas variáveis Rayleigh correlacionadas com estatísticas marginais como descritas anteriormente é dada por [7, Eq. 122]. Através de (2.7), temos as seguintes relações $R_{W1}^{\alpha_1} = R_{R1}^2$ e $R_{W2}^{\alpha_2} = R_{R2}^2$, o que implica em $\hat{r}_1^{\alpha_1} = \Omega_1$ e $\hat{r}_2^{\alpha_2} = \Omega_2$. A partir de [7, Eq. 122] e das relações aqui encontradas, a FDP conjunta de duas variáveis Weibull correlacionadas é encontrada como [13, Eq. 6-115]

$$f_{R1, R2}(r1, r2) = |J| f_{R_{R1}, R_{R2}}(r_{R1}, r_{R2}), \quad (2.8)$$

onde J é o Jacobiano da transformação, tal que $|J| = (\alpha_1 \alpha_2 / 4) r_1^{(\alpha_1/2)-1} r_2^{(\alpha_2/2)-1}$, sendo $|\cdot|$ o operador determinante. Seguindo o procedimento estatístico padrão de transformação de variáveis e após algumas manipulações algébricas, a FDP conjunta $f_{P1, P2}(\cdot, \cdot)$ das variáveis Weibull normalizadas $P_1 = R_{W1}/\hat{r}_1$ e $P_2 = R_{W2}/\hat{r}_2$ é dada por

$$f_{P1, P2}(\rho_1, \rho_2) = \frac{\alpha_1 \alpha_2 \rho_1^{\alpha_1-1} \rho_2^{\alpha_2-1}}{1 - \delta} \exp\left(-\frac{\rho_1^{\alpha_1} + \rho_2^{\alpha_2}}{1 - \delta}\right) I_0\left(\frac{2\sqrt{\delta \rho_1^{\alpha_1} \rho_2^{\alpha_2}}}{1 - \delta}\right), \quad (2.9)$$

onde $I_\nu(\cdot)$ é a função Bessel modificada de primeiro grau e ordem ν [25, eq. 9.6.18]. Para $\alpha_1 = \alpha_2 = 2$, a equação (2.9) reduz-se a [7, Eq. 122], isto é, para essas condições, (2.9) particulariza-se à

distribuição conjunta de duas envoltórias Rayleigh, como desejado.

2.1.3 Momentos Conjuntos Generalizados

Os momentos conjuntos $E(P_1^p P_2^q)$ de duas variáveis Weibull normalizadas podem ser obtidos pela equação (2.9) usando o procedimento padrão da teoria de probabilidade, isto é, $E(P_1^p P_2^q) = \int_0^\infty \rho_1^p \rho_2^q f_{P_1, P_2}(\rho_1, \rho_2) d\rho_1 d\rho_2$. Conseqüentemente,

$$E(P_1^p P_2^q) = \Gamma\left(1 + \frac{p}{\alpha_1}\right) \Gamma\left(1 + \frac{q}{\alpha_2}\right) {}_2F_1\left(-\frac{p}{\alpha_1}, -\frac{q}{\alpha_2}; 1; \delta\right) \quad (2.10)$$

onde ${}_2F_1(\cdot)$ é a função hipergeométrica de Gauss [26, Eq. 9.14.1]. Obviamente, $E(R_{W1}^p R_{W2}^q)$ pode ser obtida a partir de (2.10), pois $E(R_{W1}^p R_{W2}^q) = \hat{r}_1^p \hat{r}_2^q E(P_1^p P_2^q)$. Portanto,

$$E(R_{W1}^p R_{W2}^q) = \hat{r}_1^p \hat{r}_2^q \Gamma\left(1 + \frac{p}{\alpha_1}\right) \Gamma\left(1 + \frac{q}{\alpha_2}\right) {}_2F_1\left(-\frac{p}{\alpha_1}, -\frac{q}{\alpha_2}; 1; \delta\right) \quad (2.11)$$

Para $\alpha_1 = \alpha_2 = 2$, a equação (2.11) reduz-se à [7, Eq. 137] com $m = 1$, isto é, para essa condição, (2.11) particulariza-se aos momentos conjuntos generalizados de duas envoltórias Rayleigh. Assim como na subseção anterior, pode-se perceber que as equações aqui obtidas são simples e expressas diretamente em termos de parâmetros físicos (ou seja, de δ).

2.1.4 Coeficiente de Correlação Generalizado

O coeficiente de correlação generalizado $\delta_{p,q}$ de duas variáveis Weibull é definido como

$$\delta_{p,q} = \frac{Cov(R_{W1}^p, R_{W2}^q)}{\sqrt{Var(R_{W1}^p) Var(R_{W2}^q)}} = \frac{Cov(P_1^p, P_2^q)}{\sqrt{Var(P_1^p) Var(P_2^q)}}, \quad (2.12)$$

onde $Var(\cdot)$ e $Cov(\cdot)$ são os operadores variância [13, Eq. 5-61] e covariância [13, Eq. 6-164], respectivamente. Substituindo (2.6) e (2.10) em (2.12), e após manipulações algébricas, a expressão final para o coeficiente de correlação generalizado é

$$\delta_{p,q} = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{p}{\alpha_1}\right) \Gamma\left(1 + \frac{q}{\alpha_2}\right) \left({}_2F_1\left(-\frac{p}{\alpha_1}, -\frac{q}{\alpha_2}; 1; \delta\right) - 1\right)}{\sqrt{\left(\Gamma\left(1 + \frac{2p}{\alpha_1}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{p}{\alpha_1}\right)\right) \left(\Gamma\left(1 + \frac{2q}{\alpha_2}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{q}{\alpha_2}\right)\right)}} \quad (2.13)$$

Para $\alpha_1 = \alpha_2 = 2$, (2.13) resulta no coeficiente de correlação generalizado de duas envoltórias Rayleigh. Para $\alpha_1 = \alpha_2 = 2$ e $p = q$, (2.13) reduz a [7, Eq. 139] com $m = 1$. Em seguida, algumas particularidades de (2.13) serão apresentadas e discutidas.

2.1.5 Alguns aspectos relacionados ao coeficiente de correlação

Seja $\delta_{p,q}^R$ o coeficiente de correlação generalizado de Rayleigh tal que

$$\delta_{p,q}^R = \frac{Cov(R_{R1}^p, R_{R2}^q)}{\sqrt{Var(R_{R1}^p)Var(R_{R2}^q)}} \quad (2.14)$$

Aplicando a relação (2.7) em (2.12) e (2.14), obtemos a seguinte igualdade $\delta_{\alpha_1, \alpha_2} = \delta_{2,2}^R$. Além disso, fazendo $p = \alpha_1$ e $q = \alpha_2$ em (2.13), obtemos também que $\delta_{\alpha_1, \alpha_2} = \delta$. Isso é um resultado importante, pois mostra que o coeficiente de correlação δ iguala tanto ao coeficiente de correlação da distribuição de Weibull para $p = \alpha_1$ e $q = \alpha_2$ quanto ao coeficiente de correlação de duas envoltórias quadráticas de Rayleigh (coeficiente de correlação de potência). Portanto,

$$\delta = \delta_{\alpha_1, \alpha_2} = \delta_{2,2}^R. \quad (2.15)$$

Dessa forma, o coeficiente de correlação generalizado de Weibull $\delta_{p,q}$ pode agora ser expresso em termos do coeficiente de correlação de potência de Rayleigh $\delta_{2,2}^R$. Escrevendo, então, os processos Rayleigh em função dos processos gaussianos em fase e em quadratura, temos que $R_{Ri}^2 = X_i^2 + Y_i^2$, $i = 1, 2$. As componentes gaussianas X_i e Y_i possuem médias nulas e variâncias idênticas. Para o processo Rayleigh valem as relações $E(X_i X_j) = E(Y_i Y_j)$, $\forall i, j$, $E(X_i Y_j) = -E(X_j Y_i)$, $i \neq j$. Temos também que, para dois processos gaussianos G_i quaisquer para o qual $E(G_i) = 0$, são válidas as relações $E(G_i^4) = 3E(G_i^2)$ e $E(G_1^2 G_2^2) = E(G_1^2)E(G_2^2) + 2E^2(G_1 G_2)$. Usando isso em (2.15) e após manipulações algébricas, obtemos

$$\delta = \frac{E^2(X_1 X_2) + E^2(X_1 Y_2)}{E(X_1^2)E(X_2^2)} \quad (2.16)$$

As estatísticas acima, presentes em (2.16), podem ser aplicadas a qualquer modelo de desvanecimento de maneira a obter $\delta = \delta_{2,2}^R$. Portanto, o coeficiente de correlação de Weibull $\delta_{p,q}$ pode ser expresso em função das estatísticas conjuntas das componentes em fase e em quadratura do processo Rayleigh. Em particular, para o modelo de Jakes [1], usando (1.5-11), (1.5-14) e (1.5-15) de [1], temos que

$$\delta = \frac{E^2(D(\phi) \cos(\omega_D \tau \cos \phi - \Delta \omega T)) + E^2(D(\phi) \sin(\omega_D \tau \cos \phi - \Delta \omega T))}{E^2(D(\phi))}, \quad (2.17)$$

onde $D(\phi)$ é a diretividade horizontal da antena receptora, ϕ representa o ângulo da potência incidente, ω_D é o desvio Doppler máximo em rad/s, τ é a diferença de tempo entre os dois sinais desvanecidos, $\Delta \omega$ é a diferença de frequência entre esses sinais e T representa o atraso no tempo.

Para um espalhamento isotrópico, ou seja, distribuição angular uniforme da potência incidente, antenas receptoras omnidirecionais ($D(\phi) = 1$), e o atraso no tempo T distribuído exponencialmente, (2.17) reduz a

$$\delta = \frac{J_0^2(\omega_D \tau)}{1 + (\Delta\omega T)^2}, \quad (2.18)$$

onde $J_0(\cdot)$ é a função de Bessel de primeiro grau e ordem zero [26, Eq. 8.401]. Com os resultados obtidos nesta subseção para o parâmetro de correlação δ , fica agora claro que tanto os momentos conjuntos generalizados quanto a FDP conjunta das envoltória de Weibull podem ser expressos explicitamente em função de parâmetros físicos.

2.1.6 Autocorrelação

A função de autocorrelação no domínio do tempo $A_{R_W}(\tau)$ da envoltória Weibull R_W pode ser obtida a partir dos momentos conjuntos desnormalizados (2.11). Para $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$, $p = q = 1$ e $\hat{r}_1 = \hat{r}_2 = \hat{r}$, temos que

$$A_{R_W}(\tau) \triangleq E[R_W(t)R_W(t + \tau)] = \hat{r}^2 \Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) {}_2F_1 \left(-\frac{1}{\alpha}, -\frac{1}{\alpha}; 1; \delta\right) \quad (2.19)$$

Usando a dualidade espaço-tempo do canal sem fio [1] e considerando que o ambiente é composto por um espalhamento isotrópico, tem-se $\omega_D \tau = 2\pi d/\lambda$, onde d é a distância percorrida e λ é o comprimento de onda. Portanto, para $\Delta\omega = 0$, a função de autocorrelação espacial $A_{R_W}(d)$ da envoltória Weibull R_W é dada por

$$A_{R_W}(d) = \hat{r}^2 \Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) {}_2F_1 \left(-\frac{1}{\alpha}, -\frac{1}{\alpha}; 1; J_0^2(2\pi d/\lambda)\right) \quad (2.20)$$

Pode-se observar que as equações obtidas são simples e expressas diretamente em termos de parâmetros físicos (ou seja, δ). Nesta dissertação a função de autocorrelação de Weibull será investigada e validada através de medidas de campo.

2.1.7 Estimador do parâmetro α

A distribuição de Weibull modela o efeito resultante do sinal propagado em um certo meio manifestado em termos de uma não-linearidade. Como um dos objetivos desta dissertação é investigar e validar as estatísticas de ordem superior do processo Weibull, é necessário e suficiente conhecer seu parâmetro de não-linearidade, pois ele será uma das variáveis de entrada das funções em estudo. Para este fim, um estimador do parâmetro α , baseado no método dos momentos, é obtido a partir dos momentos da envoltória Weibull $E(R_W^k)$

$$\frac{E^i(R_W^j)}{E^j(R_W^i)} = \frac{\Gamma^i(1 + j/\alpha)}{\Gamma^j(1 + i/\alpha)} \quad (2.21)$$

Para o caso particular em que $i = 2$ e $j = 1$, (2.21) é dado por

$$\frac{E^2(R_W)}{E(R_W^2)} = \frac{\Gamma^2(1 + 1/\alpha)}{\Gamma(1 + 2/\alpha)} \quad (2.22)$$

Observa-se que o estimador é dado em termos da razão dos quadrados dos momentos de primeira e segunda ordem. Obviamente, a partir da equação (2.21) há outros estimadores; entretanto, este apresentado em (2.22) é dado pela menor ordem inteira.

Dado um conjunto de dados experimentais para a envoltória R_W , o procedimento prático para determinar o parâmetro α é achar a raiz da equação transcendental (2.22). Este método provê um estimador simples e de baixa complexidade computacional.

2.1.8 Espectro de Potência da Envoltória Weibull

O espectro de potência $S_{R_W}(\beta)$ da envoltória Weibull R_W é obtido através da transformada de Fourier¹ da sua função de autocorrelação $A_{R_W}(d)$. Embora isto conduza a um cálculo exato, aparentemente nenhuma expressão fechada pode ser encontrada. Nesta seção, uma aproximação precisa e de forma fechada para $S_{R_W}(\beta)$ é derivada. Para esta finalidade é usada a seguinte expansão da função hipergeométrica ${}_2F_1(\cdot)$ [1]

$$\begin{aligned} {}_2F_1\left(-\frac{1}{\alpha}, -\frac{1}{\alpha}; 1; J_0^2(2\pi d/\lambda)\right) &= 1 + \frac{1}{\alpha^2} J_0^2(2\pi d/\lambda) \\ &+ \frac{(1 - \frac{1}{\alpha})^2}{4\alpha^2} J_0^4(2\pi d/\lambda) + \frac{(1 - \frac{1}{\alpha})^2 (2 - \frac{1}{\alpha})^2}{36\alpha^2} J_0^6(2\pi d/\lambda) + \dots \end{aligned} \quad (2.23)$$

Desprezando os termos superiores aos de segunda ordem, a função exata de autocorrelação de Weibull $A_{R_W}(d)$ (2.20) pode ser aproximada como

$$A_{R_W}(d) \approx \tilde{A}_{R_W}(d) = \hat{r}^2 \Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \left(1 + \frac{J_0^2(2\pi d/\lambda)}{\alpha^2}\right) \quad (2.24)$$

O desvio máximo entre as funções exata e aproximada ocorre quando $d = 0$. Definindo o desvio máximo como $\Delta A_{R_W}(0) = [A_{R_W}(0) - \tilde{A}_{R_W}(0)]/\hat{r}^2$, a Figura 2.2 mostra sua curva em função do parâmetro α . De fato, o desvio é nulo quando $\alpha = 1$ e menor que 1,8% quando $\alpha > 1$. Quando $\alpha \rightarrow \infty$, as funções (2.20) e (2.24) tendem a $\hat{r}^2$ e $\Delta A_{R_W}(0) = 0$. Pode-se observar também que, para

¹A transformada de Fourier $\mathcal{F}(\beta)$ da função $f(x)$ é definida como $\mathcal{F}(\beta) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \exp(-j\beta x) dx$.

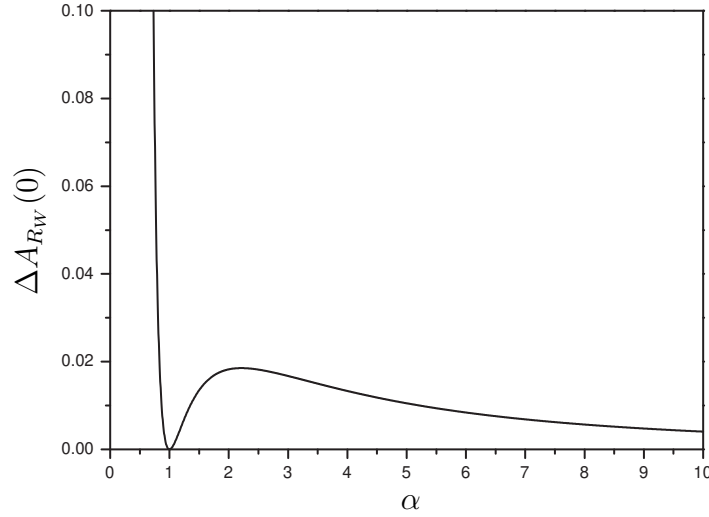


Fig. 2.2: Desvio das funções exata e aproximada da autocorrelação de Weibull para $d = 0$.

$\alpha < 1$, a aproximação afasta-se do seu valor exato. Entretanto, $\alpha < 1$, corresponde ao parâmetro $m < 0,2$ que é raramente encontrado em situações reais. Para fins práticos ($\alpha \geq 1$, $m \geq 0,2$), a aproximação proposta é de fato excelente.

Desenvolvendo a transformada de Fourier de $\tilde{A}_{RW}(d)$, pode-se calcular de forma fechada uma aproximação precisa para o espectro de potência

$$\tilde{S}_{RW}(\beta) = \hat{r}^2 \Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right) \times \left[\delta_D(\beta) + \frac{\lambda}{\pi^2 \alpha^2} K \left(\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda \beta}{2} \right)} \right) \right], \quad (2.25)$$

para $|\beta| < 2/\lambda$, onde $\delta_D(\cdot)$ é a função delta de Dirac e $K(\cdot)$ é a integral elíptica completa de primeiro grau [26, Eq. 8.112.1]. Como conferência para a exatidão desses resultados, se observa que, quando $\alpha = 2$ (condição de Rayleigh), (2.24) e (2.25) reduz-se à [1, Eq. 1.3-16] e [1, Eq. 1.3-27], respectivamente.

2.1.9 Resultados Numéricos

Esta subseção ilustra como as funções exatas e aproximadas de autocorrelação e espectro de potência da envoltória Weibull variam com valores diferentes de α . A Figura 2.3 mostra, para $\alpha = 0,5; 1; 1,5; 2; 3; 4; 5; \infty$, as funções exata e aproximada de autocorrelação. Como fora mencionado anteriormente, para $\alpha = 1$, as expressões exata e aproximada coincidem. Com $\alpha \rightarrow \infty$, o processo Weibull torna-se uma função constante, isto é, $A_{RW}(d) \rightarrow \hat{r}^2$.

A aproximação (2.25) do espectro de potência da envoltória Weibull é comparada com a formulação exata (obtida por integração numérica) na Figura 2.4. Ambas as funções são esboçadas para $\alpha = 0,5; 1$ e 2 . (A componente dc foi omitida nessas comparações.) Observa-se que, para $\alpha > 1$, as diferenças são mínimas. Analogamente à função de autocorrelação unitária, quando α tende ao infinito, o espectro revela-se puramente dc, isto é, $S_{R_W}(\beta) \rightarrow \hat{r}^2 \delta_D(\beta)$ para $\alpha \rightarrow \infty$.

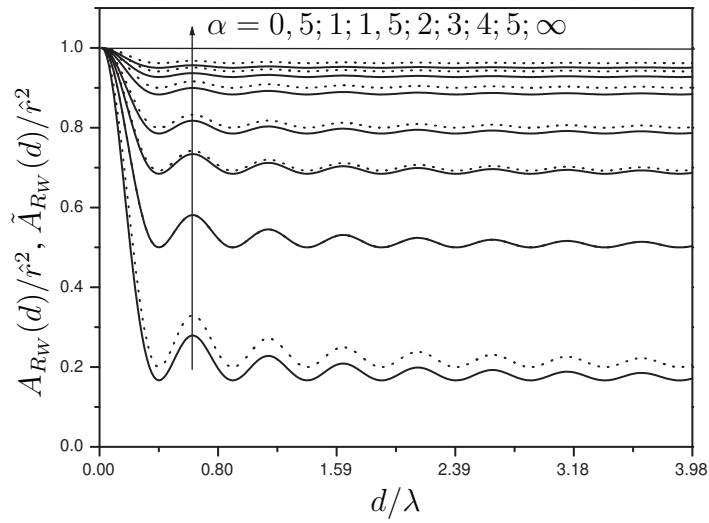


Fig. 2.3: Função de autocorrelação de Weibull (exata: sólida; aproximada: pontilhada).

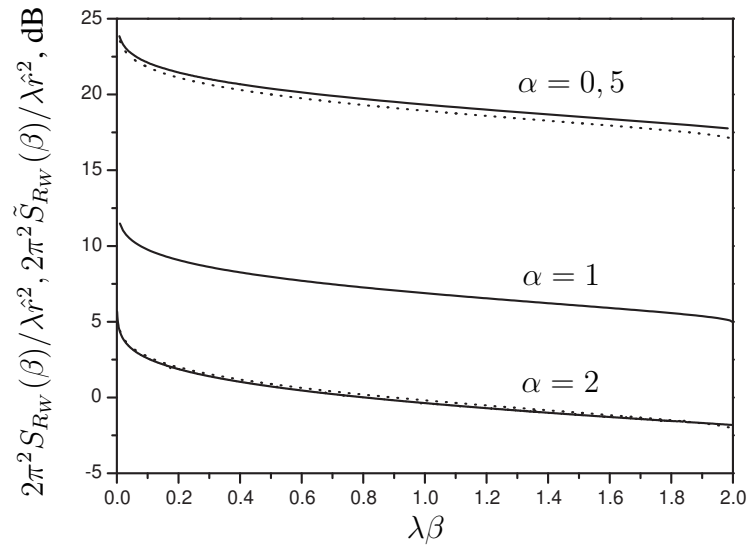


Fig. 2.4: Espectro de potência da envoltória Weibull (exato: sólida; aproximado: pontilhado).

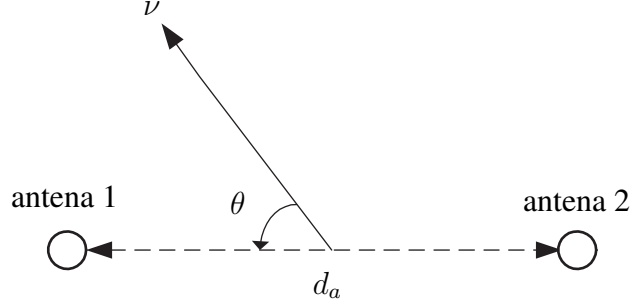


Fig. 2.5: Configuração de antenas.

2.2 Distribuição de Nakagami- m

Entre as diversas distribuições usadas para modelar os sinais com desvanecimento, a distribuição de Nakagami- m [7] tem recebido uma atenção especial pela sua facilidade de manipulação e grande aplicabilidade. Essa distribuição apresentou bons ajustes para caracterizar canais rádio-móveis [27]. O empirismo da fórmula tinha confinado o modelo de Nakagami- m a aplicações somente de estatísticas de primeira ordem e, à medida que as estatísticas de ordem superior para o desvanecimento rápido foram despertando interesse, outros estudos [28–30] foram desenvolvidos. Entretanto, vale ressaltar que a discussão explícita deste assunto com medidas de campo raramente é achado na literatura.

Esta seção objetiva apresentar expressões simples e de forma fechada às estatísticas de Nakagami- m . De forma particular, recentemente [30] foi derivada a função de correlação cruzada (FCC) entre dois processos Nakagami- m diferentemente distribuídos. A partir dela serão destacadas as duas funções de interesse desta dissertação: autocorrelação e espectro de potência da envoltória Nakagami- m .

2.2.1 Autocorrelação

Considere duas antenas omnidirecionais espaçadas horizontalmente na estação móvel, conforme mostra a Figura 2.5. O espaçamento entre as antenas é d_a e o ângulo entre o eixo das antenas e a direção do veículo ν é $0 \leq \theta \leq \pi/2$. Considere que a envoltória $R_{N_i}(t)$, $i = 1, 2$, na i -ésima antena é propagado na frequência ω_i (rad/s) e segue a distribuição de Nakagami- m com parâmetro m_i e potência média Ω_i . (Sem perda de generalidade, admitimos $m_1 \leq m_2$.) A FCC de ordem genérica $R_{R_{N_1}, R_{N_2}}(\tau) \triangleq E[R_{N_1}^k(t) R_{N_2}^l(t + \tau)]$ entre $R_{N_1}(t)$ e $R_{N_2}(t)$ é obtida como [30]

$$R_{R_{N_1}, R_{N_2}}(\tau) = \left(\frac{\Omega_1}{m_1} \right)^{k/2} \left(\frac{\Omega_2}{m_2} \right)^{l/2} \times \frac{\Gamma(m_1 + k/2) \Gamma(m_2 + l/2)}{\Gamma(m_1) \Gamma(m_2)} {}_2F_1 \left(-\frac{k}{2}, -\frac{l}{2}; m_2; \delta \right), \quad (2.26)$$

onde δ é o coeficiente de correlação, $m_i = E^2[R_{N_i}]/(E[R_{N_i}^4] - E^2[R_{N_i}^2])$ e $\Omega_i = E[R_{N_i}^2]$.

Para $m_1 = m_2 = m$, $\Omega_1 = \Omega_2 = \Omega$ e $k = l = 1$, a FCC reduz-se à autocorrelação temporal de Nakagami- m

$$A_{R_N}(\tau) = \frac{\Omega}{m} \frac{\Gamma^2(m + \frac{1}{2})}{\Gamma^2(m)} {}_2F_1\left(-\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}; m; \delta\right) \quad (2.27)$$

Quando o ambiente segue as mesmas características como as descritas na Seção 2.1.6 (espalhamento isotrópico, antena receptora omnidirecional e *delay spread* (T) seguindo uma distribuição exponencial negativa), o coeficiente de correlação pode ser expresso de maneira idêntica, isto é, $\delta = J_0^2(2\pi d/\lambda)$. Conseqüentemente, a função de autocorrelação espacial $A_{R_N}(d)$ da envoltória de Nakagami- m é expressa como

$$A_{R_N}(d) = \frac{\Omega}{m} \frac{\Gamma^2(m + \frac{1}{2})}{\Gamma^2(m)} {}_2F_1\left(-\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}; m; J_0^2(2\pi d/\lambda)\right) \quad (2.28)$$

Pode-se observar que as equações obtidas são simples e expressas diretamente em termos de parâmetros físicos (ou seja, δ). Nesta dissertação a função de autocorrelação de Nakagami- m será investigada e validada através de medidas de campo. Ao contrário do parâmetro α de Weibull, o parâmetro m de Nakagami- m já possui estimadores e são conhecidos na literatura. Nas validações, usaremos como estimador do parâmetro m , o valor de m_i em (2.26).

2.2.2 Espectro de Potência da Envoltória Nakagami- m

O espectro de potência $S_{R_N}(\beta)$ da envoltória R_N pode ser obtido de maneira similar àquela da Seção 2.1.8. Com isso, a expansão da função hipergeométrica é dada por

$${}_2F_1\left(-\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}; m; J_0^2(2\pi d/\lambda)\right) = 1 + \frac{J_0^2(2\pi d/\lambda)}{4m} + \frac{J_0^4(2\pi d/\lambda)}{32m(1+m)} + \dots \quad (2.29)$$

Desprezando os termos superiores aos de segunda ordem, a função exata de autocorrelação de Nakagami- m $A_{R_N}(d)$ pode ser aproximada como

$$A_{R_N}(d) \approx \tilde{A}_{R_N}(d) = \frac{\Omega}{m} \frac{\Gamma^2(m + \frac{1}{2})}{\Gamma^2(m)} \left(1 + \frac{J_0^2(2\pi d/\lambda)}{4m}\right) \quad (2.30)$$

Assim como no modelo de Weibull, o desvio máximo entre as funções exata e aproximada ocorre quando $d = 0$, para o qual $J_0^2(0) = 1$ e $A_{R_N}(0) = \Omega$. Definindo o desvio máximo como $\Delta A_{R_N}(0) = [A_{R_N}(0) - \tilde{A}_{R_N}(0)]/\Omega$, a Figura 2.6 mostra esse desvio em função do parâmetro m de Nakagami- m . Para $m = 0,5$, $\tilde{A}_{R_N}(0) = (3/\pi)\Omega \approx 0,954\Omega$, diferente de $A_{R_N}(0) = \Omega$ por aproximadamente 4,5%. Para $m = 1$, $\tilde{A}_{R_N}(0) = (5\pi/16)\Omega \approx 0,982\Omega$, obtém-se uma diferença de apenas 1,8%. Observa-

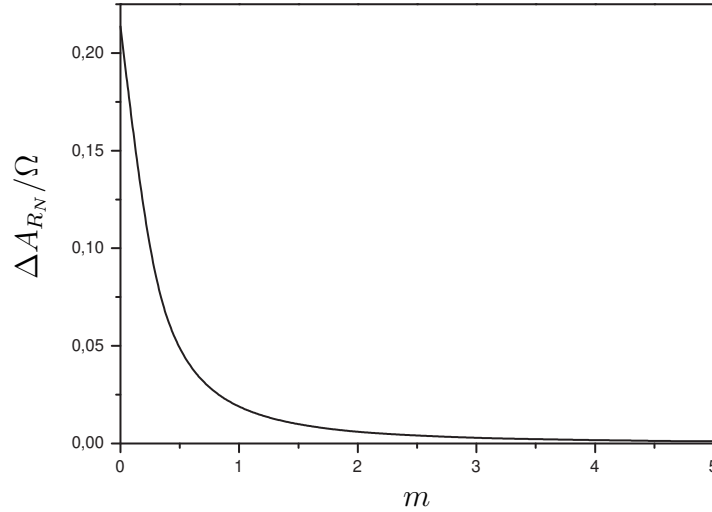


Fig. 2.6: Desvio das funções exata e aproximada de autocorrelação Nakagami- m para $d = 0$.

se que essa diferença decresce rapidamente à medida que m cresce. Quando m tende ao infinito, as funções (2.28) e (2.30) tendem a Ω e $\Delta A_{R_N}(0) = 0$. Portanto, (2.30) realmente constitui uma excelente aproximação ao valor exato $A_{R_N}(d)$ (2.28) para qualquer m .

Desenvolvendo a transformada de Fourier de $\tilde{A}_{R_N}(d)$, pode-se calcular, de forma fechada, uma aproximação precisa para o espectro de potência de Nakagami- m

$$\tilde{S}_{R_N}(\beta) = \frac{\Omega}{m} \frac{\Gamma^2(m + \frac{1}{2})}{\Gamma^2(m)} \times \left[\delta_D(\beta) + \frac{\lambda}{4\pi^2 m} K \left(\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda\beta}{2} \right)^2} \right) \right], \quad (2.31)$$

para $|\beta| < 2/\lambda$. Os resultados de (2.30) e (2.31) generalizam aqueles obtidos por Jakes [1], no qual uma aproximação similar foi usada para o caso do modelo de Rayleigh. Como conferência para a exatidão desses resultados, se observa que, quando $m = 1$ (condição de Rayleigh), (2.30) e (2.31) reduz-se a [1, Eq. 1.3-16] and [1, Eq. 1.3-27], respectivamente.

2.2.3 Resultados Numéricos

Esta subseção ilustra como as funções exatas e aproximadas de autocorrelação e espectro de potência da envoltória Nakagami- m variam com valores diferentes de m . A Figura 2.7 mostra, para $m = 0,5; 1; 1,5; 2; 3; 4; 6; 8; \infty$, as funções exata e aproximada de autocorrelação. As curvas estão quase indistinguíveis uma das outras, devido à excelente aproximação. Nota-se que, quando $m \rightarrow \infty$,

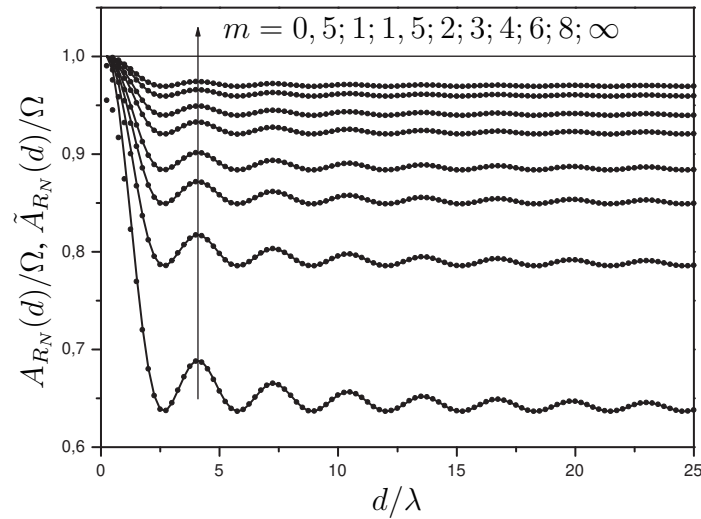


Fig. 2.7: Função de autocorrelação de Nakagami- m (exata: sólida; aproximada: pontilhada).

o processo Nakagami- m torna-se uma função constante, isto é, $A_{R_N}(d) \rightarrow \Omega$.

A aproximação (2.31) para o espectro de potência da envoltória Nakagami- m é comparada com a formulação exata na Figura 2.8. Ambos os espectros são esboçados para $m = 0, 5; 1$; e 3 . (A componente dc foi omitida nessas comparações.) Observa-se que as diferenças são mínimas. Analogamente à função de autocorrelação unitária, quando m tende ao infinito, o espectro revela-se puramente dc, isto é, $S_{R_N}(\beta) \rightarrow \Omega\delta_D(\beta)$ para $m \rightarrow \infty$.

2.3 Conclusões

Neste capítulo apresentamos duas distribuições estatísticas que têm despertado muito interesse nos estudos da caracterização do canal rádio-móvel. Foram dadas ênfases às estatísticas de ordem superior com a finalidade de preencher uma lacuna existente na literatura. Foram derivadas expressões simples e em forma fechada para as estatísticas conjuntas de duas variáveis Weibull correlacionadas, destacando as funções de autocorrelação e espectro de potência. Outro modelo, Nakagami- m , já tem sido mais explorado do que o de Weibull, entretanto, suas estatísticas de ordem superior ainda deixam espaço no estudo do canal em desvanecimento. Foram derivadas as suas funções de autocorrelação e espectro de potência a partir da função de correlação cruzada. Uma importância extremamente relevante em todos os resultados e que preenche lacuna na literatura, no caso da distribuição de Weibull, é o desenvolvimento das estatísticas de ordem superior em função de parâmetros físicos de

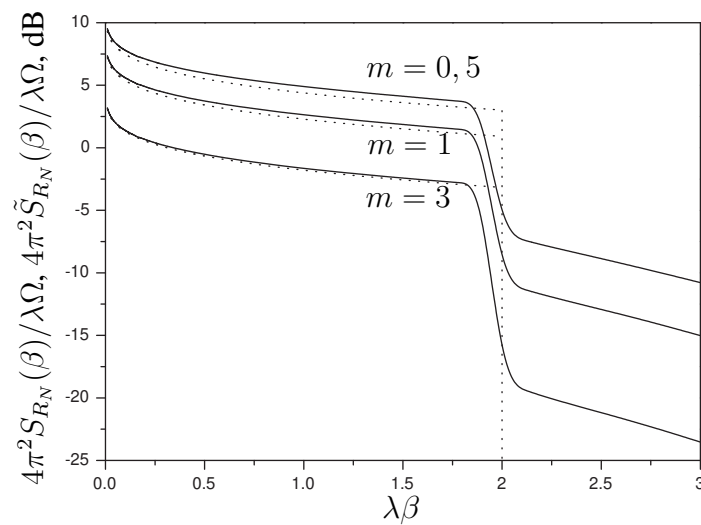


Fig. 2.8: Espectro de potência da envoltória Nakagami- m (exato: sólido; aproximado: pontilhado).

desvanecimento bem conhecidos. Esta contribuição mostra-se bastante animadora e estimula o estudo da caracterização do canal em ambientes físicos complexos.

A investigação – validações e aplicações – das estatísticas dos modelos de Weibull e Nakagami- m serão apresentados nos próximos capítulos.

Capítulo 3

Sistema de Medição

O Capítulo 2 evidenciou as estatísticas de ordem superior dos modelos de Weibull e Nakagami- m com a finalidade de investigar parâmetros que caracterizem o canal rádio-móvel. As funções de autocorrelação e espectro de potência necessitam ser analisadas e validadas. Isto deve ser realizado através de medidas de campo em diversos tipos de ambientes.

Neste capítulo, o sistema de medição utilizado para as medidas de campo é apresentado: transmissor e receptor. Um equipamento de aquisição de dados modular espacialmente controlado (EADMEC) [31] foi projetado e construído para realizar medições em banda estreita no interior e exterior de edificações. Um sistema de transmissão também foi montado com o mesmo fim. Este conjunto sistêmico é a infra-estrutura necessária para alcançar o objetivo proposto.

3.1 Transmissor

Nesta seção, o módulo transmissor é apresentado e ilustrado com o objetivo de fornecer as especificações necessárias à sua montagem.

O módulo transmissor, como mostra o diagrama da Figura 3.1, é constituído dos seguintes equipamentos:

1. Gerador de RF - Rhode&Schwartz SMY02
2. Amplificador de RF - HUGHES TWT 1177H
3. Antena omnidirecional - Kathrein
4. Cabos e conectores

O gerador pode ser sintonizado com uma frequência específica entre $9kHz$ e $2,080GHz$ (limiar do equipamento) e a potência de saída pode ser ajustada entre $-25dBm$ e $15dBm$. A saída do gerador

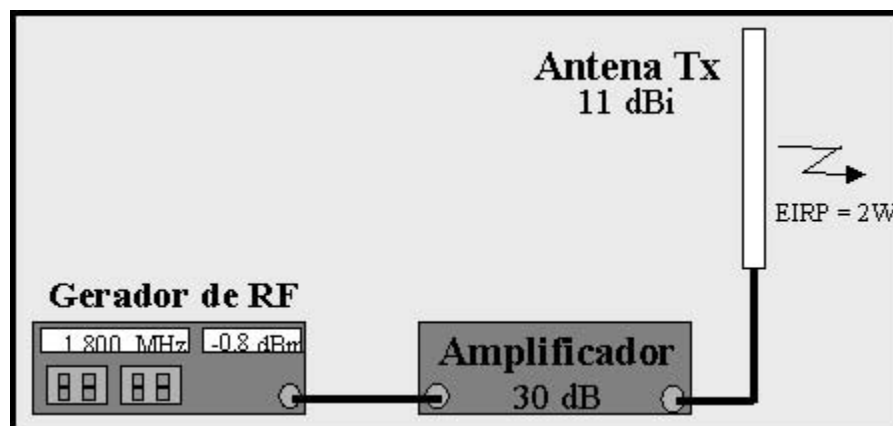


Fig. 3.1: Diagrama de blocos do transmissor.

alimenta a entrada do amplificador de RF, com ganho fixo de 30dB , proporcionando na saída uma certa potência. Em seguida, o sinal é radiado através da antena TX omnidirecional. (Obviamente, se devem considerar as perdas com os cabos e conectores.)

3.2 Receptor

O objetivo principal desta seção é descrever os detalhes para a construção e o correto funcionamento do equipamento de aquisição de dados veicular. Na descrição estão incluídos, em cada caso, as especificações, os padrões de configuração e a forma de integração dos diversos componentes.

Os equipamentos estão divididos em quatro partes independentes, conforme apresentado no diagrama de blocos da Figura 3.2: amostrador espacial, medidor do sinal, adquiridor de dados e fornecedor de energia.

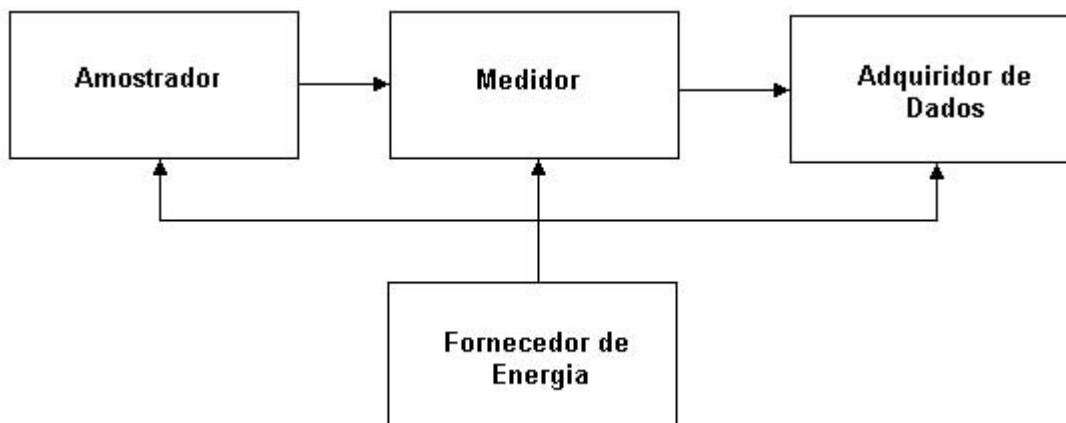


Fig. 3.2: Diagrama de blocos do equipamento de aquisição de dados.

Primeiro, o sistema é configurado com uma amostragem espacial. A cada passo válido dentro dessa amostragem, é verificado o nível de sinal através do medidor. Em seguida, as duas informações são armazenadas pelo adquiridor de dados e, posteriormente, processadas. Em função de sua construção modular, o EADMEC possibilita outras configurações através da substituição adequada dos módulos.

3.2.1 Amostrador espacial

Essa parte é a responsável em prover o controle espacial do equipamento e está dividida em dois componentes: roda dentada e circuito amostrador.

Roda dentada

Este componente define a distância de amostragem do sinal. Ela consiste de uma chapa de alumínio dentada, com 1,2mm de espessura, acoplada a uma quinta roda. Esta quinta roda fica presa ao equipamento de aquisição de dados através de um braço mecânico que permite a movimentação do conjunto quinta roda/roda dentada no sentido vertical (Figura 3.3). Para cada dente que passa pelo circuito amostrador, uma amostra é coletada. O número de dentes da roda (n) deve ser definido de



Fig. 3.3: Detalhe do amostrador espacial (roda dentada + circuito).

acordo com a distância de amostragem desejada para o sinal. Como essa distância é igual à distância entre dentes da roda (d_d), o valor n pode ser obtido pela através da seguinte equação:

$$n = \frac{\pi D}{d_d}, \quad (3.1)$$

onde D é o diâmetro da roda.

Para que o sinal seja corretamente reproduzido, a máxima distância entre as amostras é igual a um quarto do comprimento de onda (λ) do sinal medido [3]. Substituindo o número de dentes por esse valor, isto é, $d_d = \pi/4$, na equação 3.1, se obtém a quantidade mínima teórica de dentes (n_{min_t}) na roda:

$$n_{min_t} = \frac{4\pi D}{\lambda}, \quad (3.2)$$

ou em função da frequência (f_p), fazendo a substituição $\lambda = c/f_p$, onde c é a velocidade da luz, igual a aproximadamente 3×10^8 m/s, temos:

$$n_{min_t} = \frac{\pi D f_p}{0,75 \times 10^8}. \quad (3.3)$$

Considerando que desvanecimentos de 40 dB abaixo do nível médio do sinal são comuns, com sucessivos mínimos ocorrendo a cada meio comprimento de onda ($\lambda/2$) [1], e que intervalos de amostragem menores que um décimo do comprimento de onda asseguram estatísticas realistas deduzidas a partir dos dados [32], o número mínimo de amostras, n_{min} , que deverá ser coletado pode ser reescrito:

$$n_{min} = \frac{\lambda/4}{\lambda/10} \times \frac{\pi D f_p}{0,75 \times 10^8} \therefore$$

$$n_{min} = 2,5 \times \frac{\pi D f_p}{0,75 \times 10^8} \quad (3.4)$$

Por outro lado, a limitação de velocidade da placa de aquisição implica em um limitante do número máximo de dentes que a roda pode possuir. Este número não pode ultrapassar a condição em que a frequência de passagem dos dentes (f_p) seja superior à frequência de aquisição da placa (f_{aq}). Caso este limite seja ultrapassado, amostras serão perdidas.

Para se calcular este limite superior, pode-se escrever n , agora n_{max} , em função da velocidade de movimentação do equipamento (v). Para isto, basta considerar que o tempo de uma volta da roda (t) seja dado por:

$$t = \frac{n_{max}}{f_{aq}}, \quad (3.5)$$

Este tempo pode, também, ser escrito como:

$$t = \frac{\pi D}{v_{max}}, \quad (3.6)$$

onde v_{max} é a velocidade máxima com que se deseja mover o equipamento de aquisição de dados durante as medidas.

Substituindo a equação (3.5) na equação (3.6) tem-se:

$$n_{max} = \frac{\pi D f_{aq}}{v_{max}}. \quad (3.7)$$

Portanto, utilizando-se os dois limitantes calculados, equações (3.4) e (3.7), tem-se:

$$2,5 \times \frac{\pi D f_p}{0,75 \times 10^8} \leq n \leq \frac{\pi D f_{aq}}{v_{max}}, \quad (3.8)$$

A velocidade v_{max} pode ser determinada pelo projetista (7 km/h, por exemplo) quando há definição dos limitantes e, conseqüentemente, selecionado um valor para n . Após escolhido o valor de n , se tem uma nova velocidade máxima para o equipamento (v'_{max}), que será dada por:

$$v'_{max} = \frac{\pi D f_{aq}}{n}, \quad (3.9)$$

Considerando a placa de aquisição de dados utilizada nesta configuração do EADMEC (Apêndice A) e utilizando-se de uma abordagem de processamento adequada, foi obtida uma frequência de aquisição f_{aq} , igual a 300 Hz. (A Seção 3.2.3 detalhará tal procedimento.)

Com o objetivo de exemplificar a obtenção de resultados a partir das equações supracitadas, são apresentados a seguir os valores utilizados no equipamento de aquisição de dados:

$$D = 22cm, f_p = 1,8GHz, f_{aq} = 300Hz, v_{max} = 2m/s \cong 7km/h \quad (3.10)$$

Aplicando-se à equação (3.8), obtém-se:

$$41 < n < 104 \quad (3.11)$$

Selecionou-se para este projeto uma roda com $n=57$ dentes. Desta forma, além de se assegurar uma boa amostragem do sinal, há um folga razoável com relação à velocidade, o que possibilita uma flexibilidade maior para o uso do equipamento de aquisição de dados veicular em outras aplicações

de interesse. Aplicando a equação (3.9), obtém-se:

$$v'_{max} = 3,6m/s \cong 13km/h, \quad (3.12)$$

Esta é uma velocidade apropriada, por estar bem acima daquela praticada por uma pessoa ao caminhar. Poder-se-ia optar por uma quantidade de dentes maior, até o limite superior calculado de $n = 104$. Por outro lado, para uma versão motorizada do equipamento de aquisição de dados, com velocidades superiores a 4 m/s (14,4 km/h), deverá ser selecionada uma placa de aquisição de maior velocidade e, conseqüentemente, de maior custo.

Circuito amostrador

Esse componente tem a função de transformar a passagem dos dentes da roda em um trem de pulsos a ser aplicado à placa de aquisição de dados.

A rotação do disco dentado aciona o interruptor óptico. Esse interruptor, que consiste de um LED acoplado a um fototransistor através de uma fenda de 3mm, produz um trem de pulsos a uma taxa proporcional ao número de ranhuras por metro e à velocidade de caminhada. Este sinal faz com que a placa de aquisição leia uma amostra do sinal de rádio que está sendo recebido pela antena naquele instante.

Durante a passagem de um dente da roda através da fenda, o sinal do LED é interrompido. Nesta condição o circuito gera um nível TTL. Quando a passagem é desobstruída, ou seja o sinal do LED chega ao receptor óptico, é gerado um nível de 0 VDC. Esse circuito, de fácil implementação e baixo custo, é alimentado por uma tensão de 12 VDC.

3.2.2 Medidor do sinal

Essa parte, responsável pela medição do sinal, é composta por quatro componentes: antena, amplificador, atenuador variável e analisador de espectro.

A maior vantagem dessa solução consiste no fato de não ser necessário construir um sistema receptor próprio para medir o nível e potência do sinal de RF na faixa de UHF; o receptor foi substituído por um analisador de espectro, ou seja, um equipamento comum e que está presente na maioria dos laboratórios de comunicações sem fio.

Antena

A antena é constituída por um monopolo, omnidirecional, acoplado a um plano de terra, fixo no equipamento de aquisição de dados. O sinal de RF recebido pela antena é encaminhado ao atenuador

variável.

Amplificador/Atenuador variável

A função do conjunto amplificador/atenuador variável é manter o nível do sinal recebido na porção linear da faixa da operação do medidor de sinal. Esta faixa é de -122 dBm a -47 dBm no caso deste equipamento de aquisição de dados veicular. Foi selecionado um amplificador de baixo ruído (LNA) para o sistema (veja Apêndice A). No caso das medições ocorrerem nas proximidades da antena transmissora, há a necessidade de se aplicar um certo nível de atenuação, embora nunca superior a 20 dB para não comprometer a figura de ruído e a faixa dinâmica de operação do conjunto.

O sinal CW recebido pela antena, após passar pelo atenuador e pelo amplificador é acoplado, na sequência, ao analisador de espectro.

Analisador de espectro

As maiores exigências de especificações para esse equipamento de medição são poder operar na faixa de frequência da portadora transmitida e ser robusto quanto à variação da temperatura ambiente, além de apresentar uma boa resistência às vibrações mecânicas originadas em função da movimentação do equipamento de aquisição de dados.

Para o analisador de espectro desempenhar adequadamente o papel de sistema receptor foram adotados os seguintes valores com relação aos parâmetros de configuração: faixa de frequência (*span*), tempo de varredura (*sweep time*), largura de faixa de vídeo (*VBW*) e largura de faixa (*BW*):

- O *span* foi ajustado em 0 Hz. Assim, o equipamento opera como um osciloscópio (receptor), medindo a potência de uma portadora simples.
- O *sweep time* foi fixado no menor valor possível. Dessa maneira, pode ser visualizado na tela um sinal na forma de um segmento de reta, uma vez que não se está disponibilizando tempo suficiente para alterações no nível do sinal antes do mesmo ser completamente desenhado. Um valor adequado para o *sweep time* é 15 μ s.
- O *VBW* e o *BW* são parâmetros que definem o formato dos filtros internos do analisador. Quanto menor forem os valores selecionados, menor será a largura de banda desses filtros e, portanto, menos ruído será captado pelo equipamento; por outro lado, cresce a sensibilidade com relação a mudanças de temperatura, uma vez que a variação de temperatura pode afetar a frequência central dos filtros em questão. Isto é, a seleção dos valores está diretamente correlacionada à faixa de valores de potência que o equipamento de aquisição de dados consegue medir, o que, por sua vez, depende do modelo de analisador utilizado. Os melhores valores para o modelo

de analisador de espectro usado no equipamento de aquisição de dados foram 10 kHz e 30 Hz para o *VBW* e o *BW*, respectivamente.

A coleta dos dados medidos pelo analisador foi efetuada através da saída de vídeo. Essa saída provê uma tensão que representa a amplitude do sinal desenhado na tela. A amplitude, por sua vez, é proporcional ao nível de potência medido. É suficiente, portanto, determinar essa proporção, e com isso definir a potência de recepção da portadora.

A saída de vídeo do analisador de espectro é conectada à placa de aquisição de dados.

3.2.3 Adquiridor de dados

Essa parte é responsável pela aquisição e armazenamento das medidas. Ela é composta por duas partes: a placa de aquisição de dados e o conjunto computador/*software*.

Placa de aquisição de dados

A especificação mais importante para a placa é a sua velocidade ou frequência de aquisição. A frequência de operação deve permitir acompanhar com folga a produção de pulsos gerados pela roda dentada, com a movimentação do equipamento de aquisição de dados, conforme considerações feitas na Seção 3.2.1. Como há a necessidade de adquirir somente dois sinais (a saída de vídeo do analisador e o sinal do circuito amostrador), a placa deve operar apenas com duas entradas analógicas. Isso simplifica o programa de tratamento de dados e possibilita a utilização de uma placa de baixo custo.

A placa de aquisição de dados, ilustrada na Figura 3.4, recebe, na sua entrada, os sinais de vídeo do analisador e do circuito amostrador, e fornece, na saída, um sinal digital a ser armazenado na memória do computador.

Computador/Programa

Não há especificações para o computador. Pode ser utilizado qualquer modelo, de acordo com a disponibilidade. Quanto ao programa de controle do sistema do equipamento de aquisição de dados, sua função é ler as amostras coletadas pela placa de aquisição de dados externa e gravar seus valores em arquivos de texto que permitam seu futuro processamento.

O programa de controle foi desenvolvido em LabVIEW 6.1. Esse ambiente de desenvolvimento de programa permitiu que, além da tarefa básica de armazenamento das amostras, fossem implementadas novas funcionalidades. Estas auxiliam a execução e o monitoramento das medidas e, portanto, possibilitam a verificação do andamento do trabalho em tempo real.



Fig. 3.4: Placa de aquisição de dados.

A Figura 3.5 ilustra a interface com o usuário do programa. Na parte superior dessa interface, o usuário pode selecionar o arquivo onde as amostras são armazenadas e acompanhar a evolução de seu tamanho durante os períodos de aquisição. Na parte intermediária estão situados o controle que dispara e interrompe a aquisição de dados e uma janela de visualização dos sinais adquiridos nos quatro canais analógicos utilizados. Abaixo desse gráfico, são exibidos a velocidade de deslocamento do equipamento de aquisição de dados, o número de amostras válidas recolhidas até o momento e a distância percorrida. Por fim, na parte inferior da interface foi reservada uma área para a apresentação de mensagens ao usuário.

A placa de aquisição de dados deve ser utilizada para monitorar, fundamentalmente, os sinais provenientes do circuito amostrador e da saída de vídeo do analisador de espectro. Na interface do programa, estes foram chamados de *Encoder* (codificador) e Sinal de RF, respectivamente. Dessa forma, a tarefa do programa é, essencialmente, registrar o Sinal de RF a cada transição de descida do sinal *Encoder*. Inicialmente, o sinal proveniente da roda dentada, por se tratar de sinal digital, foi encaminhado a uma entrada contadora da placa de aquisição de dados. Essa primeira abordagem mostrou-se ineficiente, pois o tempo necessário para a identificação do incremento desse contador e a leitura do sinal de retraço limitou a velocidade máxima de deslocamento do sistema a valores

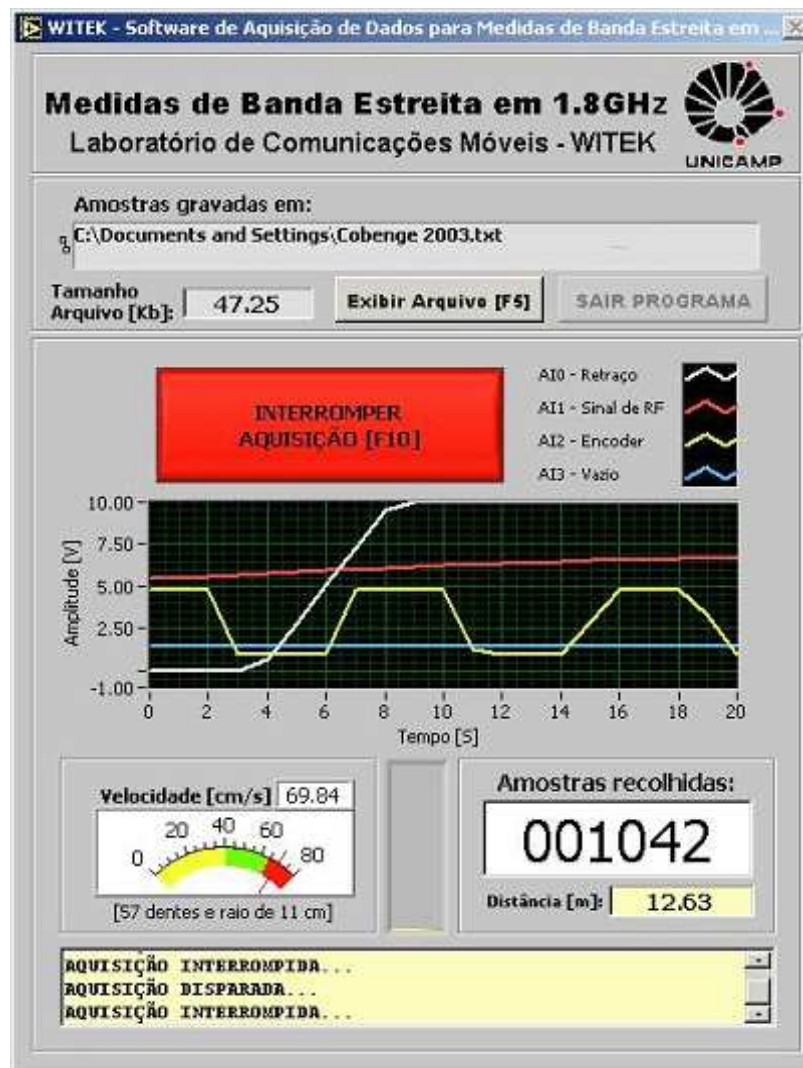


Fig. 3.5: Interface do programa com o usuário.

extremamente baixos. Esse problema se deve primordialmente ao fato de que o acesso ao valor do contador e a leitura do canal analógico utilizado para o retraço são realizados por comandos diferentes. Para contornar essa situação e tendo em vista que o circuito de aquisição possui quatro canais analógicos, o sinal proveniente da roda dentada, embora de natureza digital, foi amostrado através de um dos canais analógicos. As aquisições nos canais analógicos passam a ser feitas simultaneamente e na maior taxa possível, sendo a identificação dos instantes onde acontecem as transições, e, portanto, os instantes de valores válidos para o Sinal de RF, realizada exclusivamente por programa. Essa estratégia permitiu a amostragem dos quatro canais analógicos a 300 vezes por segundo, o que permite que o sistema do equipamento de aquisição de dados possa ser utilizado com folga na faixa de velocidade de uma pessoa caminhando. No modo de operação utilizado pela placa de aquisição, os valores

amostrados são enviados em rajadas ao microcomputador de controle, cada uma delas contendo uma série de amostras. Essas amostras são, então, processadas e, na medida em que transições do *Encoder* são identificadas, o valor do Sinal de RF é registrado.

3.2.4 Fornecedor de Energia

Essa parte tem por objetivo permitir a mobilidade irrestrita do equipamento. O intuito é tornar o equipamento auto-suficiente com relação ao suprimento de energia e propiciar uma autonomia adequada durante um número mínimo satisfatório de horas de trabalho. Para isso, foi necessário utilizar duas baterias, além de um inversor. As baterias operam simultaneamente em duas condições: diretamente, alimentando as partes do sistema que funcionam em corrente contínua (DC), e, indiretamente, alimentando o inversor. Esse último, por sua vez, alimenta os componentes que funcionam em corrente alternada (AC). O amplificador e o circuito amostrador funcionam em DC, enquanto que o analisador de espectro e o computador portátil funcionam em AC. Para as funções acima descritas foram selecionadas baterias automotivas comuns de 12 volts e capacidade igual a 63 ampères-hora. O esquema adotado (Apêndice A) resultou em uma autonomia média de seis horas e quarenta minutos.

Capítulo 4

Medidas de Campo e Validações

Este capítulo apresenta as validações das funções de autocorrelação e espectro de potência dos modelos de Weibull e Nakagami- m através de medidas de campo realizadas no campus da Unicamp. Foram investigados diversos tipos de ambientes através do sistema apresentado no Capítulo 3. As curvas teóricas são comparadas com as empíricas seguindo os mesmos parâmetros de campo. Os erros encontrados confirmam o excelente ajuste entre os dados comparados. São discutidas as aplicações de cada distribuição segundo as características dos ambientes medidos.

4.1 Medidas de Campo

Uma série de medidas de campo foi realizada na Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) com a finalidade de validar as funções de autocorrelação e espectro de potência das envoltórias de Weibull e Nakagami- m . O transmissor foi fixado no topo do prédio E da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação (FEEC). O gerador foi sintonizado na frequência de 1800 MHz e a potência de saída ajustada em $-0,8$ dBm. A saída do gerador alimenta a entrada do amplificador de RF, com ganho de 30 dB, proporcionando em sua saída, computada as perdas com cabos e conectores, uma potência de 28,4 dBm. Na saída do amplificador de potência foi acoplada, através de um cabo de 22 cm, uma antena monopolo omnidirecional, com ganho de 11 dBi, transmitindo uma potência efetivamente radiada (ERP) de 2 W. Foram consideradas as perdas nos conectores e cabos, conforme mostra a Figura 4.1. Os equipamentos do sistemas transmissão (exceto a antena) foram alocados no interior de uma sala localizada na cobertura para evitar eventuais problemas causados pelo ambiente externo, tais como chuvas e ventos no período de realização das medidas, conforme ilustrado na Figura 4.2.

O sistema de recepção foi configurado especialmente para estas medidas. Antes de iniciar a campanha de medição, deve-se levantar a curva de calibração do analisador de espectro. O analisador

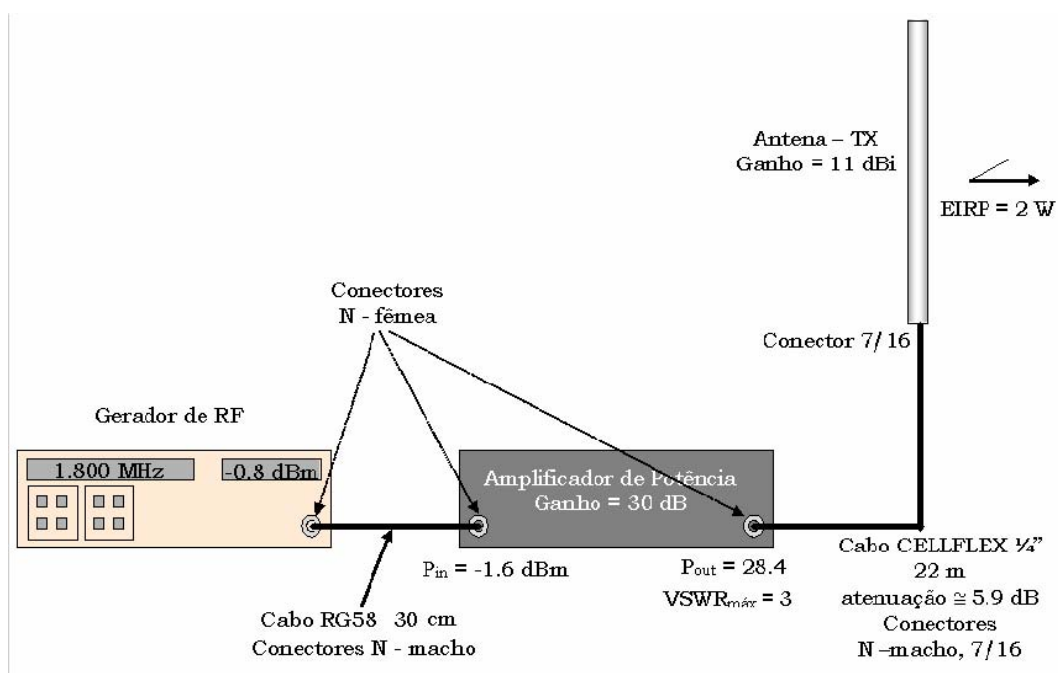


Fig. 4.1: Diagrama da configuração do transmissor.



Fig. 4.2: Vista da cobertura do prédio E da FEEC.

possui uma curva de calibração que relaciona a variação de tensão na saída de vídeo com a variação de potência no seu *display*. Essa curva é determinada ligando a saída do gerador de varredura diretamente na entrada do analisador de espectro. Em seguida, varia-se a potência do gerador de varredura e anota-se o valor da potência, em dBm, que chega no analisador de espectro e o valor correspondente, em volts, na saída de vídeo do mesmo. A tabela com os dados coletados no analisador de espectro pode ser analisada em um programa que encontra, por regressão linear, a curva de calibração do equipamento. Para esta dissertação, a curva de calibração obtida é mostrada abaixo:

$$P = -96,2658561 + 80,8051031V \quad (4.1)$$

onde P é a potência em dBm e V tensão em volts.

De posse da curva de calibração e com todos os ajustes mecânicos feitos no veículo, a campanha de medição pode ser iniciada. Durante o percurso os passos para a coleta do sinal são os seguintes:

1. O sinal de RF é captado pela antena;
2. Passa pelo conjunto Atenuador e Amplificador de Baixo Ruído (LNA);
3. Chega ao Analisador de Espectro ajustado em zero *span* e na mesma frequência transmitida;
4. A saída de vídeo do analisador é utilizada como uma das entradas analógicas do equipamento de aquisição de dados;
5. A outra entrada analógica da placa é o circuito amostrador que assegura a taxa de amostragem de $\lambda/14$ [33–35] na aquisição dos dados;
6. Finalmente, o computador recebe o dados digitalizados e os armazena na memória.

Para essa análise, foi desenvolvido um programa para a leitura e armazenamento dos valores no formato de vetores. Em seguida, foi efetuada a separação dos fenômenos de desvanecimento lento e rápido para possibilitar uma análise mais precisa. O processo de separação [3], consiste no cálculo de médias em janelas temporais, isto é, o cálculo estatístico conhecido como média móvel. A quantidade de amostras utilizadas para o cálculo depende do ambiente no qual foram realizadas as medidas e do comprimento de onda do sinal [35]. No nosso caso, foram utilizadas 450 amostras por média, o que corresponde a uma extensão de “janela móvel” da ordem de 30 comprimentos de onda, na frequência de 1800 MHz. A partir dos dados filtrados, obtivemos a envoltória do sinal e os parâmetros de desvanecimento α de Weibull e m de Nakagami- m foram estimados.

4.2 Ambientes das Medições

As medidas foram realizadas em diversos ambientes *indoor* e *outdoor* no campus da Unicamp com o objetivo de se ter uma boa variedade de aspectos físicos semelhantes aos encontrados em áreas urbanas, semi-urbanas e rurais.

4.2.1 *Indoor*

Para os ambientes *indoor*, além da campanha de medição realizada para este estudo, foram utilizadas as medições realizadas em [36]. No total foram escolhidos seis prédios para a nossa análise. Alguns destes prédios situam-se a poucos metros do transmissor como, por exemplo, o prédio da Pós-graduação da FEEC, Figura 4.3, e outros a algumas centenas de metros, como o prédio de salas de aula da Faculdade de Engenharia Civil (FEC), Figura 4.4 e o ginásio de esportes, Figura 4.5. Os prédios apresentam alturas que variam de um a três andares e características construtivas e arquitetônicas diferentes. No total foram utilizadas medidas em 12 andares diferentes, em salas e corredores, e na quadra do ginásio.



Fig. 4.3: Prédio da Pós-graduação da FEEC.

4.2.2 *Outdoor*

Para os ambientes *outdoor* foram realizadas medições em nove rotas diferentes. De maneira similar, algumas rotas passavam a poucos metros do transmissor como, por exemplo, nas ruas frontais ao prédio da Pós-graduação da FEEC e ao prédio do Departamento de Microeletrônica (DEMIC), e outras rotas a algumas centenas de metros como, por exemplo, as áreas externas à prefeitura e à



Fig. 4.4: Prédio de salas de aula da FEC.



Fig. 4.5: Vista lateral do ginásio de esportes.

rotatória do ciclo básico. Dentre as características podemos ressaltar que foram medidas regiões com a presença e a ausência de arborização, linha de visada, veículos e pessoas.

4.3 Técnica de Medição

Os processos citados e comentados nas seções anteriores à montagem de um veículo de aquisição de dados são de conhecimento da comunidade científica da área. Entretanto, uma questão particular e crucial que determina a possibilidade ou não de realizar medições analisando estatísticas de ordem superior é a técnica de medição empregada.

A técnica utilizada para as medições deste trabalho é extremamente simples. É necessário que o veículo percorra uma determinada rota adquirindo pontos não repetidos no espaço. Por exemplo: ruas e corredores devem ser percorridos em linha reta e sem dar mais que uma volta; quadras e salas devem ser medidas com apenas uma volta; rotatórias também com apenas uma volta circular. Deste modo, a autocorrelação empírica pode ser calculada da maneira correta, sem múltiplos dados de potência no mesmo espaço.

4.4 Validações

Durante as campanhas de medição os dados foram sendo armazenados no computador para o processamento das validações. Para essa análise, devemos obter os parâmetros empíricos de cada ambiente, quais sejam a envoltória do sinal e os parâmetros de desvanecimento de cada modelo. Depois da filtragem do desvanecimento rápido, a envoltória de cada sinal pode ser computada e, logo em seguida, os parâmetros de desvanecimento α e m são obtidos.

A autocorrelação empírica é computada de acordo com

$$\hat{A}_R(\Delta) = \frac{\sum_{i=1}^{N-\Delta} r_i r_{i+\Delta}}{\sum_{i=1}^{N-\Delta} r_i^2} \quad (4.2)$$

onde r_i é a i -ésima amostra da amplitude, N é o número total de amostras, Δ is the diferença discreta da distância relativa e $\hat{A}_R(\cdot)$ denota um estimador empírico de $A_R(\cdot)$.

Um dos métodos para validar uma formulação teórica é compará-la com a mesma formulação obtida através de dados empíricos. Portanto, as funções de autocorrelação teóricas foram comparadas com as suas fórmulas empíricas correspondentes e traçadas em função de d/λ com os mesmos parâmetros α e m de desvanecimento. Além disto, o erro médio absoluto¹, ϵ , foi computado para cada caso.

Com o objetivo de validar as formulações de Espectro de Potência para Weibull e Nakagami- m , as mesmas foram comparadas com os dados medidos. Para essa finalidade, usamos a transformada discreta de Fourier (DFT) – implementada pelo algoritmo de FFT – para computar a transformada de Fourier das Autocorrelações empíricas. Conseqüentemente, as funções de Espectro de Potência empíricas S_R foram obtidas.

No total, foram traçados 24 gráficos, considerando todos os ambientes. As Figuras 4.7 à 4.30 mostram alguns deles, comparando as Autocorrelações e Espectro de Potências experimentais e teóricas para diferentes parâmetros α e m das duas distribuições. Observa-se um excelente ajuste e nota-se

¹O erro médio absoluto entre o dado medido x_i e o valor teórico y_i é definido como $\epsilon = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|y_i - x_i|}{x_i}$, onde N é o número total de pontos.

que as curvas teóricas tendem a seguir a mudança de concavidade dos dados experimentais.

Para um melhor entendimento, dividiremos cada tipo de ambiente medido em grupos diferentes, segundo suas características físicas. A Figura 4.6 mostra o mapa da Unicamp onde podem ser localizadas as ruas e os prédios medidos envolvidos na medição.

- **Grupo 1.** (Figuras 4.7 à 4.12)

Os ambientes são caracterizados pelo fenômeno de multipercurso e ausência de visada direta. As atenuações ocorrem, principalmente, devido aos obstáculos: paredes e pisos de concreto, tijolos e metais; mobília de madeira e metal; pessoas transitando.

Observamos que as distribuições de Weibull e Nakagami- m obtiveram resultados excelentes e semelhantes. Esse comportamento era esperado devido às duas distribuições se proporem a modelar esse tipo de ambiente. Entretanto, considerando as suas facilidades de implementação, os erros obtidos são motivo de apreciação. Particularmente, deve-se ressaltar a eficácia da distribuição de Weibull, pois a mesma conseguiu tais resultados fazendo uso de sua extrema simplicidade matemática e, conseqüentemente, utilizando um tempo de processamento computacional bem menor em relação à Nakagami- m .

Aplicações: Áreas urbanas densas, interiores de edificações sem cobertura *indoor* (picocélulas) e/ou *outdoor* nas proximidades.

- **Grupo 2.** (Figuras 4.13 à 4.18)

Os ambientes são caracterizados pela predominância do fenômeno de multipercurso e pouca incidência de raios de visada direta. As atenuações ocorrem, principalmente, devido ao espaço livre e aos obstáculos: árvores, veículos, pessoas, prédios.

Observamos que as distribuições obtiveram resultados excelentes e semelhantes na maioria dos casos. Quanto maior a relevância do fenômeno de visada direta, maior foi o erro encontrado, havendo destaque positivo para o modelo de Weibull em relação ao de Nakagami- m . De fato, a distribuição de Weibull mostrou sua flexibilidade e conseguiu modelar um pouco melhor esses ambientes.

Aplicações: Áreas urbanas densas e semi-urbanas, interiores e exteriores de edificações.

- **Grupo 3.** (Figuras 4.19 à 4.24)

Os ambientes são caracterizados pela predominância de visada direta e algumas múltiplas reflexões. As atenuações ocorrem, principalmente, devido ao espaço livre e aos obstáculos: árvores e veículos.

Observamos que as distribuições não seguiram a eficácia dos Grupos 1 e 2, isto é, na maioria dos casos obtiveram erros mais relevantes. Esse comportamento é bastante curioso e pode ser

especulado que tais ambientes não possuem características isotrópicas. Nem mesmo a distribuição de Weibull pôde exercer sua flexibilidade para obter melhores resultados.

Aplicações: Áreas semi-urbanas e rurais, ambientes abertos, avenidas e rodovias largas.

- **Grupo 4.** (Figuras 4.25 à 4.30)

Os ambientes são caracterizados pela alta incidência dos raios de visada direta e as múltiplas reflexões são desconsideradas. As atenuações ocorrem principalmente devido ao espaço livre.

Observamos que, de forma surpreendente, as distribuições de Weibull e Nakagami- m obtiveram resultados excelentes. Ao contrário do que se esperava, pois essa não era a proposta dos modelos, as duas distribuições conseguiram obter erros bem pequenos e seguiram a tendência das curvas empíricas medidas nesses ambientes. A distribuição de Weibull novamente se destacou com a sua capacidade de caracterização das não-linearidades do meio, simplicidade matemática e menor tempo de processamento computacional em relação à Nakagami- m .

Aplicações: Áreas rurais, rodovias largas com pouco movimento, túneis retilíneos.

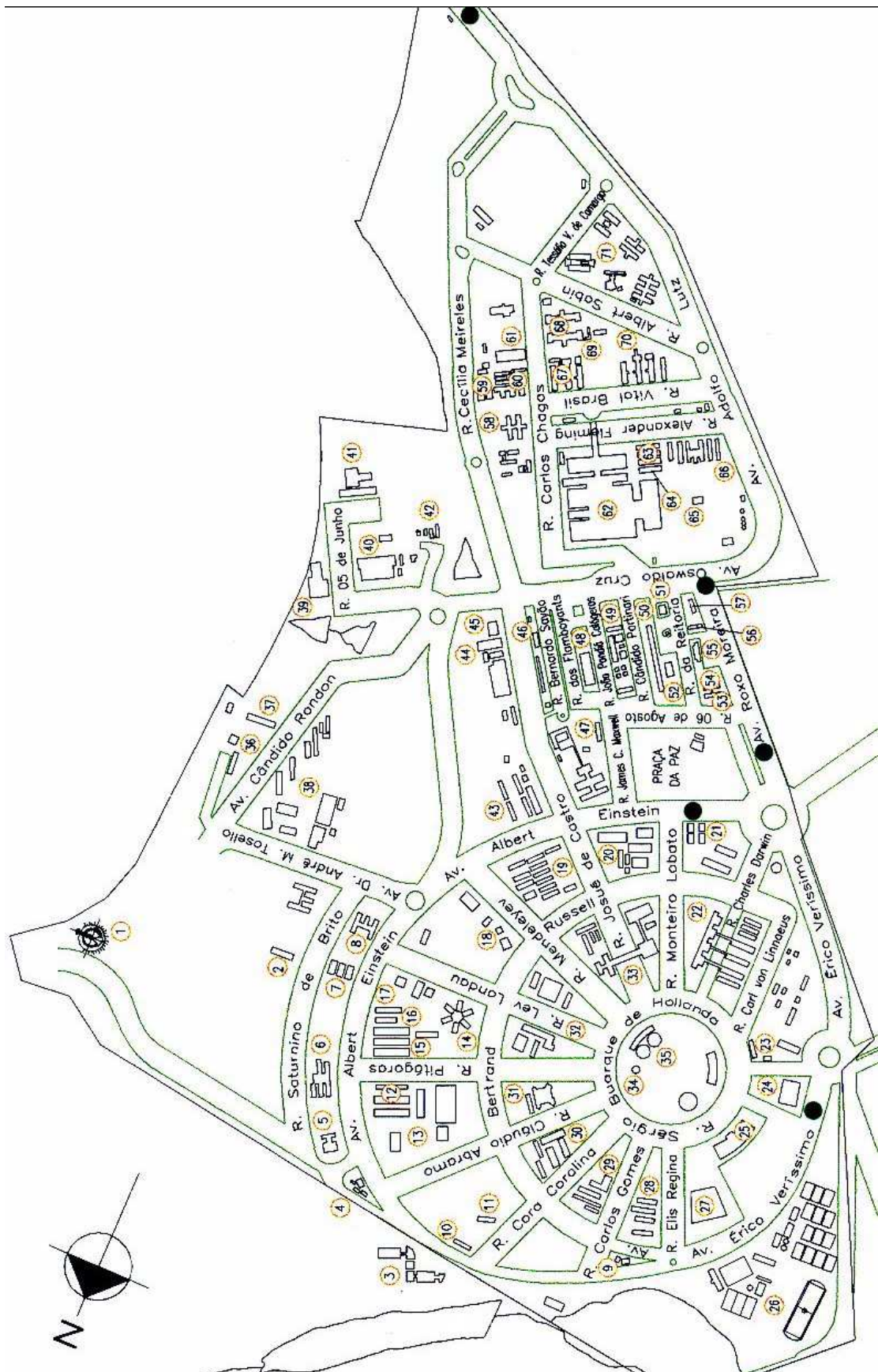


Fig. 4.6: Mapa da Universidade Estadual de Campinas.

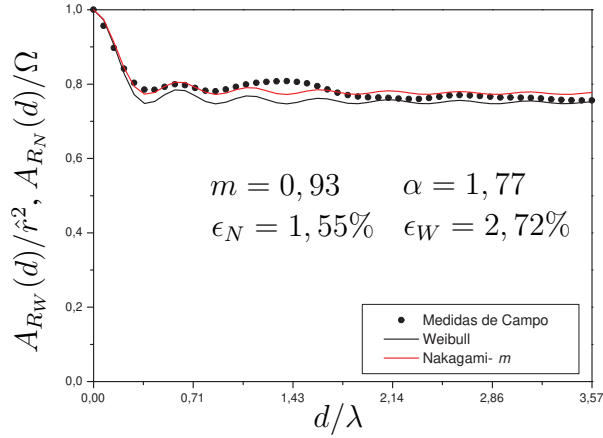


Fig. 4.7: Local: Rua Carlos Chagas.

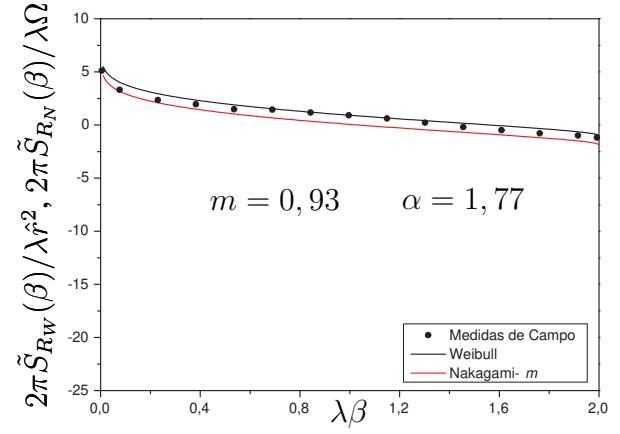


Fig. 4.10: Local: Rua Carlos Chagas.

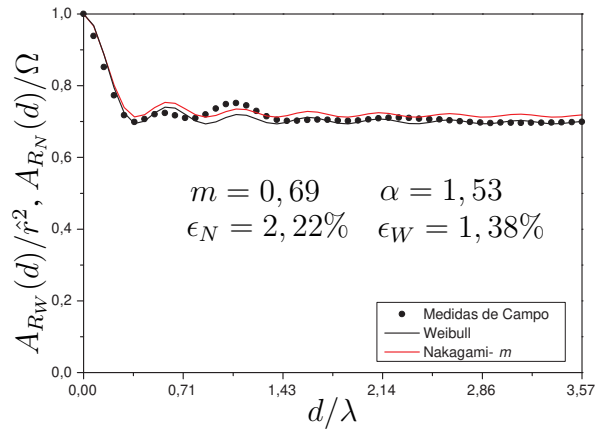


Fig. 4.8: Local: Rua Carlos Gomes.

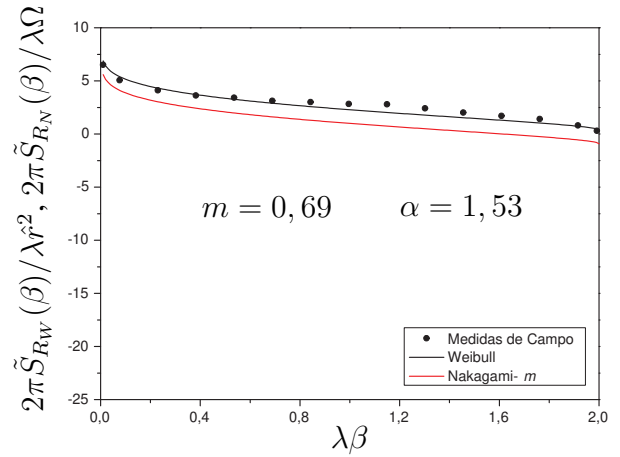


Fig. 4.11: Local: Rua Carlos Gomes.

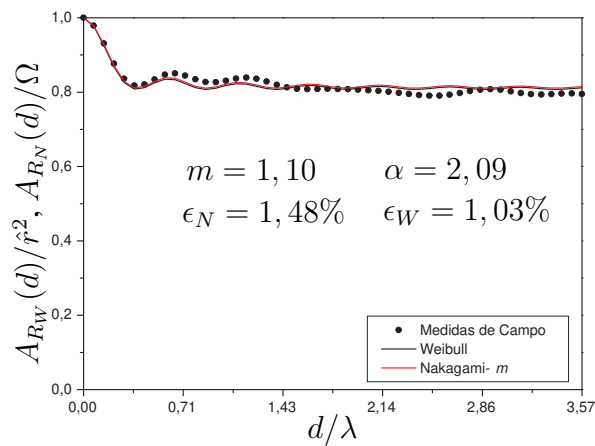


Fig. 4.9: Local: Quadra do Ginásio (n.27).

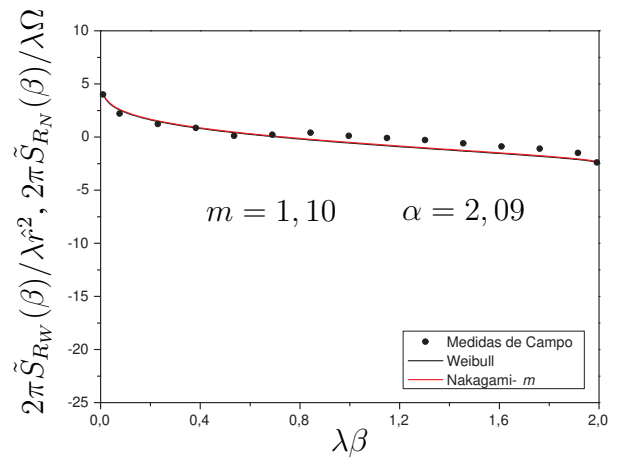


Fig. 4.12: Local: Quadra do Ginásio (n.27).

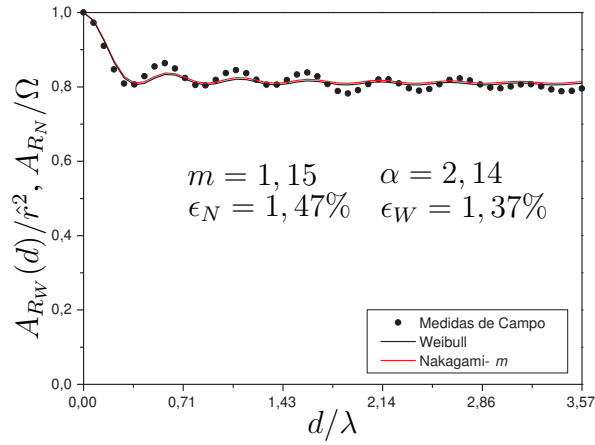


Fig. 4.13: Local: Corredor 2o andar - CPG/FEEC (n.47).

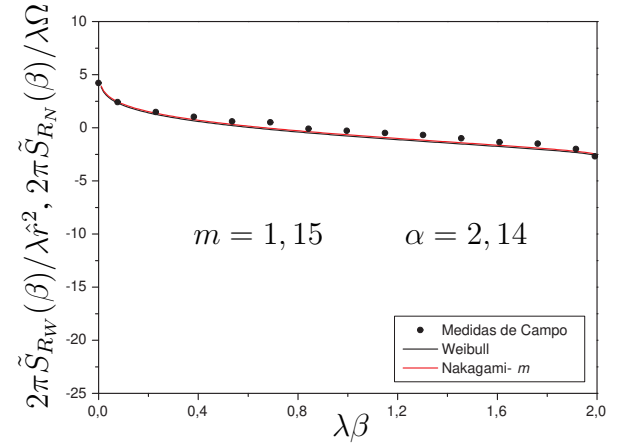


Fig. 4.16: Local: Corredor 2o andar - CPG/FEEC (n.47).

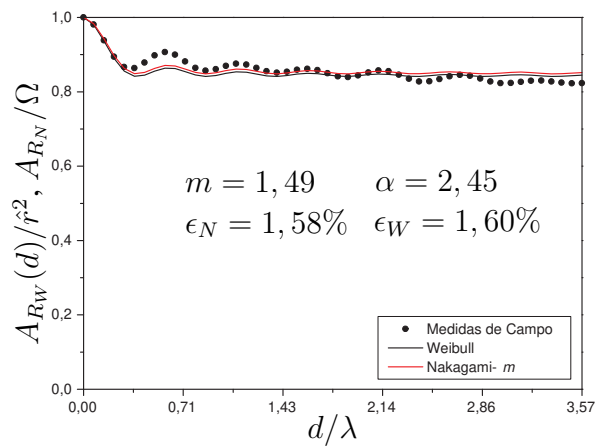


Fig. 4.14: Local: Rua dos Flamboyants.

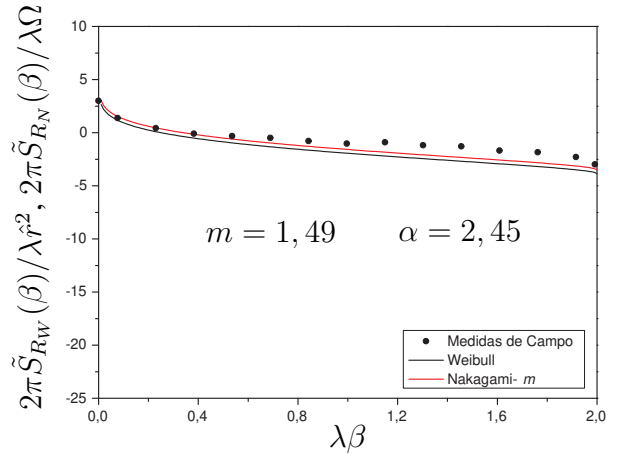


Fig. 4.17: Local: Rua dos Flamboyants.

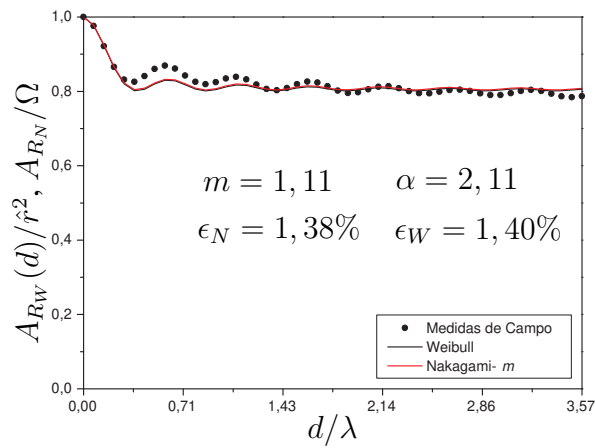


Fig. 4.15: Local: Prédio DEMIC (n.48).

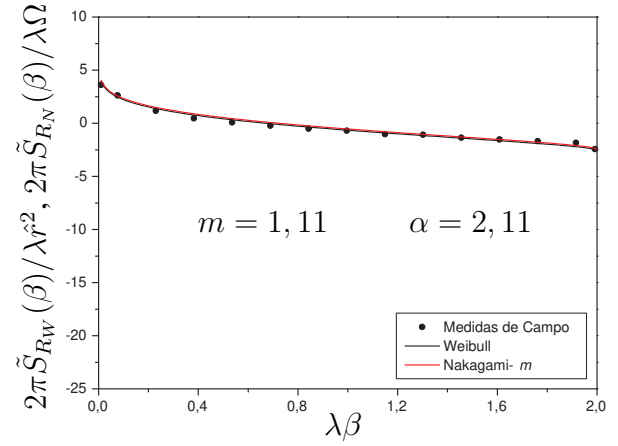


Fig. 4.18: Local: Prédio DEMIC (n.48).

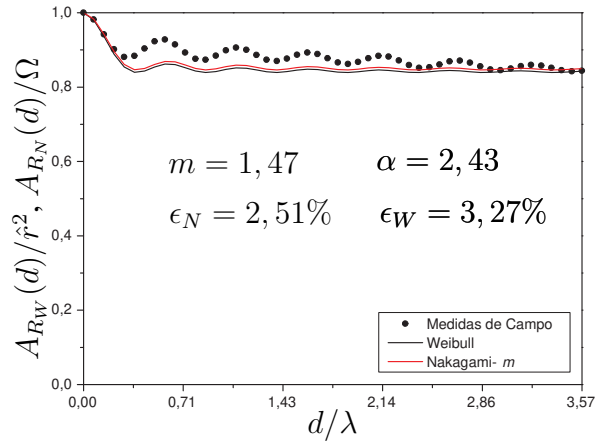


Fig. 4.19: Local: Rua Bernardo Sayão.

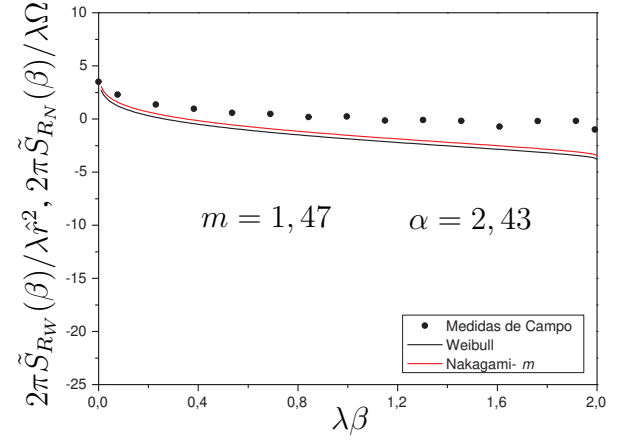


Fig. 4.22: Local: Rua Bernardo Sayão.

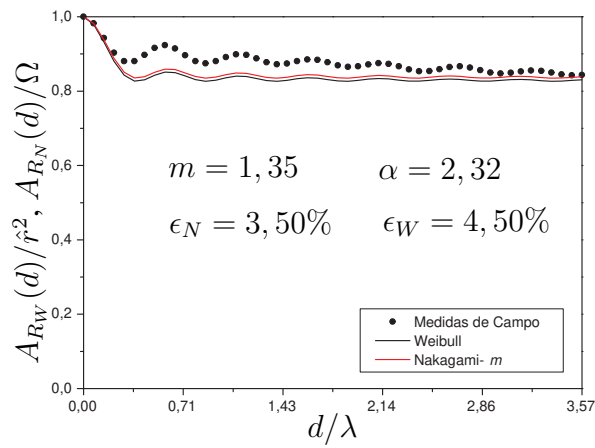


Fig. 4.20: Local: Rua James C. Maxwell.

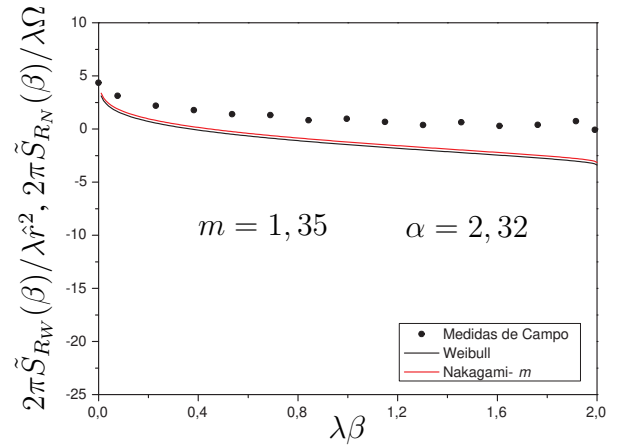


Fig. 4.23: Local: Rua James C. Maxwell.

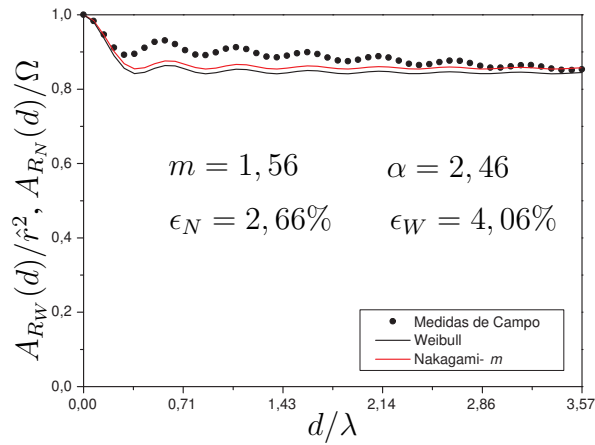


Fig. 4.21: Local: Rua Bernardo Sayão.

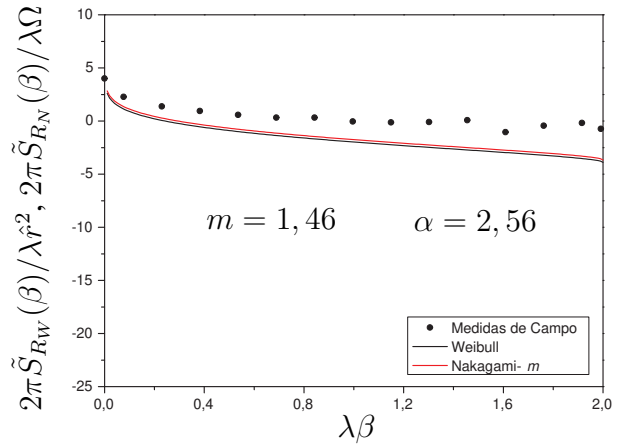


Fig. 4.24: Local: Rua Bernardo Sayão.

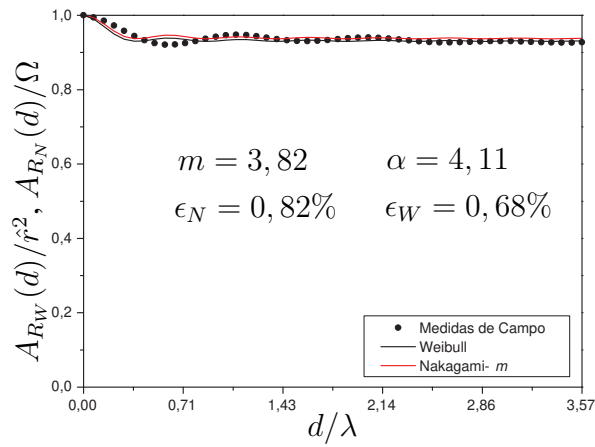


Fig. 4.25: Local: Estacionamento do Banespa (n.51).

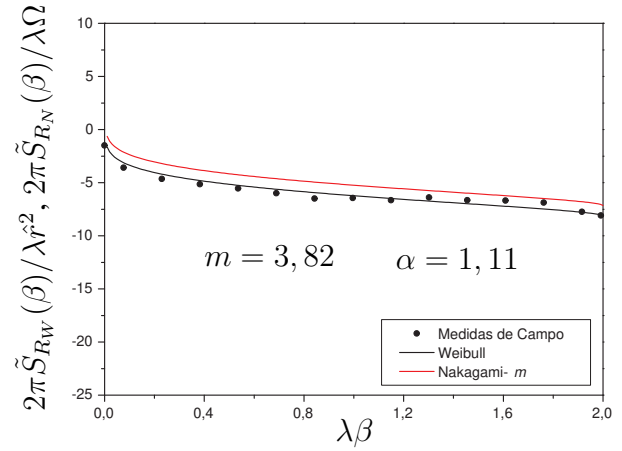


Fig. 4.28: Local: Estacionamento do Banespa (n.51).

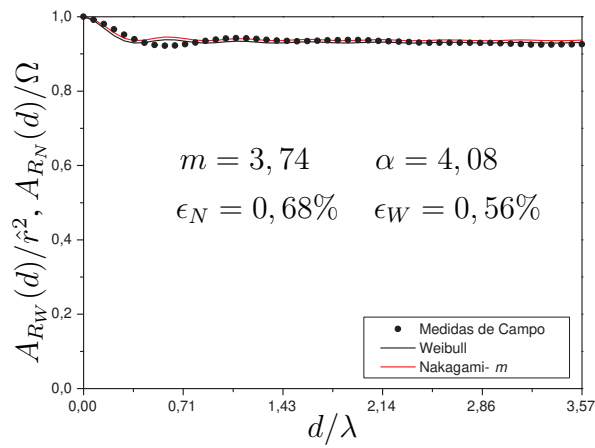


Fig. 4.26: Local: Estacionamento do Banespa (n.51).

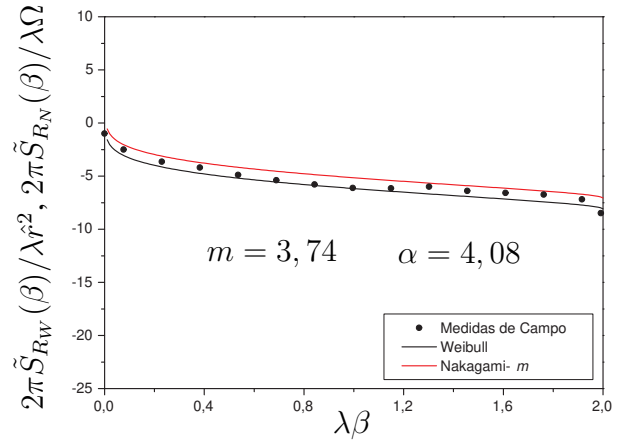


Fig. 4.29: Local: Estacionamento do Banespa (n.51).

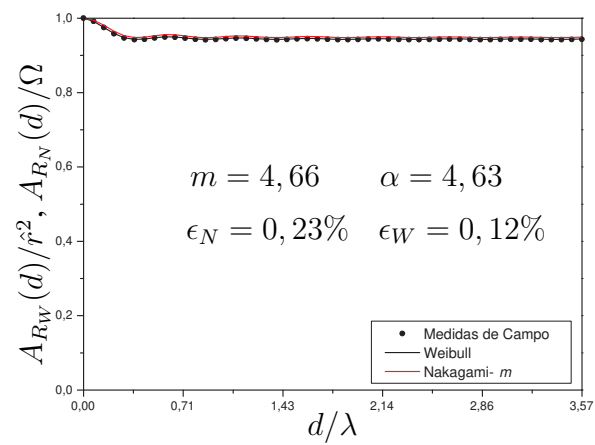


Fig. 4.27: Local: Estacionamento do Banespa.

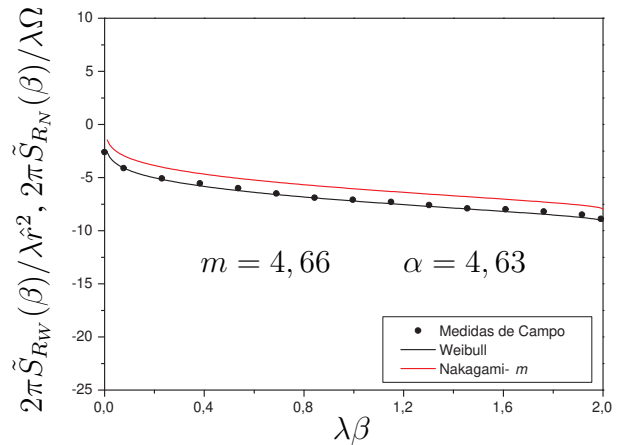


Fig. 4.30: Local: Estacionamento do Banespa.

4.5 Conclusões

Os ambientes investigados ilustram de forma representativa a performance das estatísticas de segunda ordem das distribuições Weibull e Nakagami- m . As medidas de campo realizadas em condições bem diferenciadas possibilitaram um estudo seguro e eficiente.

As formulações teóricas foram confrontadas com a realidade prática e um resultado excelente foi obtido: a validação da Autocorrelação e do Espectro de Potência das distribuições Weibull e Nakagami- m .

As duas distribuições tinham como proposta inicial modelar os ambientes caracterizados pelo fenômeno do multipercurso e assim o fizeram; entretanto, foi constatado que em outro ambiente, isto é, com puramente visada direta, as distribuições obtiveram um comportamento excelente. Ressalte-se a simplicidade de implementação da distribuição de Weibull e sua capacidade de caracterizar as não-linearidades do meio, tornando-a uma distribuição muito atrativa nas aplicações para o canal rádio-móvel. Com base nesse estudo, a utilização de Weibull e Nakagami- m é aconselhada em ambientes isotrópicos onde há somente multipercurso, ou predominância de multipercurso ou pura visada direta, com ligeira vantagem da distribuição de Weibull sobre a Nakagami- m (melhor ajuste e menor esforço computacional).

Capítulo 5

Considerações Finais

O estudo das estatísticas de ordem superior constitui uma grande contribuição para a caracterização do canal rádio-móvel em comunicações sem fio. As formulações obtidas para a distribuição Weibull são originais e a origem da obtenção das formulações de Nakagami- m também é nova. As técnicas de medições foram essenciais para o êxito do estudo, pois foram empregadas especialmente para este fim.

Apesar de todos os ajustes feitos no EADMEC, algumas dificuldades surgiram durante as medições. A principal foi o desalinhamento do fototransistor com LED no circuito amostrador. Isso acontecia quando o EADMEC transitava por vias extremamente irregulares e esburacadas. A solução momentânea era alinhar e apertar novamente os parafusos de sustentação em cada caso de desalinhamento. Como essa é a parte mais sensível do veículo, conseqüentemente é a que sofre mais com a instabilidade causada pelos terrenos e pisos. Um sistema de amortecimento será necessário para solucionar definitivamente esse problema.

O EADMEC encontra-se com uma carga bastante significativa. Isso torna o sistema pouco prático para campanhas de medição longa, em prédios sem elevador e em vias não planas. Deve ser estudada uma forma de reduzir essa carga. Sugerem-se algumas medidas: mudar o material de construção do veículo para um mais leve e resistente; redimensionar as baterias DC visando colocar somente uma (ou nenhuma) ao invés de duas; o analisador de espectro poderia, dependendo do objetivo da medição, ser substituído por um aparelho de comunicação portátil sem fio como, por exemplo, um celular. Entretanto, deve-se tomar cuidado se a carga do EADMEC for reduzida de forma significativa, pois outro problema poderá surgir: a perda (ou redução significativa) do atrito das rodas em pisos muito lisos. A solução sugerida para esse caso é simples, bastando trocar os pneus das rodas por outros que forneçam maior atrito.

5.1 Investigações Futuras

Os estudos foram desenvolvidos com uma única fonte transmissora e uma única fonte receptora. Seria interessante transmitir duas ou mais portadoras diferentes e adaptar o EADMEC para receber esses sinais em um único analisador de espectro com duas ou mais antenas espaçadas. Assim, poderá ser analisado, dentre outros efeitos, o da correlação cruzada.

Seria interessante, também, realizar medições em outras frequências como, por exemplo, 2400, 3500 e 5800 MHz. Para isto, o sistema irradiante deverá ser adaptado para a faixa de frequência em operação. Além disso, poderia ser realizada uma campanha de medição em ambientes com grande movimentação de pessoas e, posteriormente, sem a presença das mesmas. Assim, seria possível estudar com maior eficácia os efeitos que a presença das pessoas causam no sinal rádio-móvel.

Além das distribuições estudadas e validadas nesta dissertação, outras distribuições podem ser investigadas como, por exemplo, Rice e Hoyt.

O crescente aumento do número de usuários dos serviços de comunicações sem fio faz com que necessitemos entender, compreender bem e modelar os fenômenos que ocorrem nos mais variados ambientes. As novas tecnologias continuarão surgindo e as pessoas utilizarão cada vez mais os recursos oferecidos. Espera-se que este trabalho tenha fornecido elementos para melhorar o estudo dessas tecnologias.

Referências Bibliográficas

- [1] W. C. Jakes. *Microwave Mobile Communications*. New York: Wiley, 1974.
- [2] T. S. Rappaport. *Wireless Communications - Principles and Practice*. New Jersey, IEEE Press/Prentice-Hall, 1996.
- [3] M. D. Yacoub. *Foundantios of Mobile Radio Engineering*. CRC Press, Florida, 1993.
- [4] W. C. Y. Lee. *Mobile Communications Engineering*. 1997.
- [5] J. G. Proakis. *Digital Communications*. McGraw-Hill, 2001.
- [6] R. S. Hoyt. Probability functions for the modulus and angle of the normal complex variate. *Bell System Technical Journal*, pages 26:318–359, Apr. 1947.
- [7] M. Nakagami. *The m-Distribution - A General Formula of Intensity Distribution of Rapid Fading*. Statistical Methods in Radio Wave Propagation. W. C. Hoffman, Ed. Elmsford, NY: Pergamon, 1960.
- [8] M. D. Yacoub. The η - μ distribution: A general fading distribution. In *IEEE Veh. Technol. Conference*, volume 2, pages 872–877, Sep. 2000.
- [9] M. D. Yacoub. The κ - μ and the η - μ distribution. *Accepted for publication in IEEE Ant. and Prop. Magazine*, 2005.
- [10] M. D. Yacoub. The κ - μ distribution: A general fading distribution. In *IEEE Veh. Technol. Conference*, volume 3, pages 1427–1431, Oct. 2001.
- [11] M. D. Yacoub. The α - μ distribution: A general fading distribution. In *IEEE Intern. Symp. on Personal, Indoor, and Mobile Radio Commun.*, volume 2, pages 629–633, Sep. 2002.
- [12] M. D. Yacoub. The α - μ distribution: a physical fading model for the generalized Gamma distribution. *Accepted for publication in IEEE Trans. Veh. Technol.*, 2006.

- [13] A. Papoulis. *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*. 4th edition, 2002.
- [14] S. Haykin. *Communication Systems*. 4th edition, 2001.
- [15] N. S. Adawi. Coverage prediction for mobile radio systems operating in the 800/900 MHz frequency range. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 37:3–72, Feb. 1988.
- [16] H. Hashemi. The indoor radio propagation channel. *Proc. IEEE*, 81:943–968, Jul. 1993.
- [17] N. H. Shepherd. Radio wave loss deviation and shadow loss at 900 MHz. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 26:309–313, Nov. 1977.
- [18] G. Tzeremes and C. G. Christodoulou. Use of Weibull distribution for describing outdoor multi-path fading. In *Proc. IEEE Antennas and Propagation Soc. Int. Symp.*, volume 1, pages 232–235, Jun. 2002.
- [19] S. J. Howard and K. Pahlavan. Fading results from narrowband measurements of the indoor radio channel. In *IEEE Int. Symp. Personal, Indoor, and Mobile Radio Commun. PIRMC*, pages 92–97, London, Sep. 1991.
- [20] F. Babich and G. Lombardi. Statistics analysis and characterization of the indoor propagation channel. *IEEE Trans. Commun.*, 48(3):455–464, Mar. 2000.
- [21] J. D. Parsons. *The Mobile Radio Channel*, volume 1. Wiley, Chichester, U.K., 2nd edition, 2000.
- [22] M. S. Alouini and M. K. Simon. Performance of generalized selection combining over Weibull fading channels. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, pages 1735–1739, May 2001.
- [23] N. C. Sagias, D. A. Zogas, G. K. Karagiannidis, and G. S. Tombras. Performance analysis of switched diversity receivers in Weibull fading. *IEE Electron. Lett.*, 39:1472–1474, Oct. 2003.
- [24] N. C. Sagias, P. T. Mathiopoulos, and G. S. Tombras. Selection diversity receivers in Weibull fading: Outage probability and average signal-to-noise ratio. *IEE Electron. Lett.*, 39:1859–1860, Dec. 2003.
- [25] M. Abramowitz and I. A. Stegun, Eds. *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*. New York: Dover, 1972.
- [26] I. S. Gradshteyn and I. M. Ryzhik. *Table of Integrals, Series, and Products*. Academic Press, 6th edition, 2000.

- [27] H. Suzuki. A statistical model for urban radio propagation. *IEEE Trans. Commun.*, 25, Jul. 1977.
- [28] M. D. Yaboub, J. E. V. Bautista, and L. G. de R. Guedes. On high order statistics of the nakagami- m distribution. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 43(3):790–794, May 1999.
- [29] A. Abdi, K. Wills, H. A. Barger, M.-S. Alouini, and M. Kaveh. Comparison of the level crossing rate and average fade duration of rayleigh, rice and nakagami fading models with mobile channel data. volume 4, pages 1850–1857. IEEE 52nd Vehicular Technology Conference, Sep. 2000.
- [30] J. C. S. Santos Filho, G. Fraidenraich, U. S. Dias, and M. D. Yacoub. On the nakagami- m crosscorrelation function. IEEE International Microwave and Optoelectronics Conference, 2005.
- [31] H. B. Tercius, M. D. Yaboub, L. F. Crocomo, L. C. Kretly, F. C. Martins, and A. F. de Toledo. Eadmec - equipamento de aquisição de dados modular espacialmente controlado. Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia, COBENGE, Set. 2003.
- [32] J. Hiroshi. 1.2 GHz band wave propagation measurements in concrete building for indoor radio communications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, VT-35(4):146–152, Nov. 1986.
- [33] B.R. Davis and R.E. Bogner. Propagation at 500 MHz for mobile radio. *IEE Proc.*, 5, Aug. 1985.
- [34] Jun Horikoshi, Kiyoshi Tanaka, and Takahiro Morinaga. 1.2 GHz Band Wave Propagation Measurements in Concrete Building for Indoor Radio Communications. *IEEE Trans. Vehic. Technol.*, 35(4), 1986.
- [35] A. F. Toledo. *Narrowband Characterisation of Radio Transmissions into and within Buildings at 900, 1800, and 2300 MHz*. PhD thesis, Dept. Elec. Eng. and Electron., Univ. of Liverpool, U.K., May 1992.
- [36] M. D. Yacoub, F. C. Martins, and H. B. Tercius. Medidas de banda estreita em 1800MHz e as distribuições gerais de fading κ - μ e η - μ . XXI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, SBrT'04, Set. 2004.

Apêndice A

Especificações Técnicas

Este apêndice fornece as especificações técnicas dos componentes utilizados na montagem do equipamento de aquisição de dados, além de fotos do sistema completo. O equipamento foi projetado para operar na frequência de operação de 1800MHz.

- **Roda dentada:** Feita em chapa de alumínio de 1,2mm, com 57 dentes. Esta roda é acoplada a uma quinta roda que fica presa ao equipamento de aquisição de dados através de um braço mecânico. Este braço permite a movimentação do conjunto quinta roda/roda dentada no sentido vertical.
- **Circuito amostrador:** Já descrito na Seção 3.2.1.
- **Antena Receptora:** Kathrein, modelo K704784. Faixa de frequência de operação 1710-1880MHz. Conexão cabo RG 174.
- **Atenuador:** Agilent, modelo 8496A. Atenuador manual para frequências na faixa de 0-4GHz com atenuação variável de 0-110dB, em passos de 10dB.
- **Amplificador:** Mini-circuits, modelo ZHL-1724HLN-case NN92. Frequência de operação 1700-2400MHz. Amplificação de 40dB e alimentação na faixa de 12-16VDC.
- **Analizador de espectro:** HP, modelo 8593E, com frequência de operação de 0-22GHz.
- **Placa de aquisição:** Labjack, modelo U12 (Labjack U12). Conectada ao PC ou a um HUB através de uma porta USB (Barramento Serial Universal). A porta USB fornece alimentação e comunicação para a placa Labjack U12. Composta por um conector USB, um conector DB25 para entradas/saídas digitais e trinta terminais do tipo parafuso (*screw*).

- **Computador portátil:** Toshiba, modelo Satellite 1800-S254. Processador Pentium III 1GHz, 1Gb de memória RAM, disco rígido de 20Gb. Tela TFT de 14.1”.
- **Inversor:** Marca SMS, modelo Manager III senoidal. Potência máxima de saída de 1300VA, tensão de entrada 127V, frequência de saída 60Hz $\pm$ 1%.
- **Baterias:** Duas baterias. Marca AC Delco, modelo 011AO63D1, 12V, 63Ah.

As fotos abaixo ilustram o equipamento de aquisição de dados, com detalhe para a roda dentada.

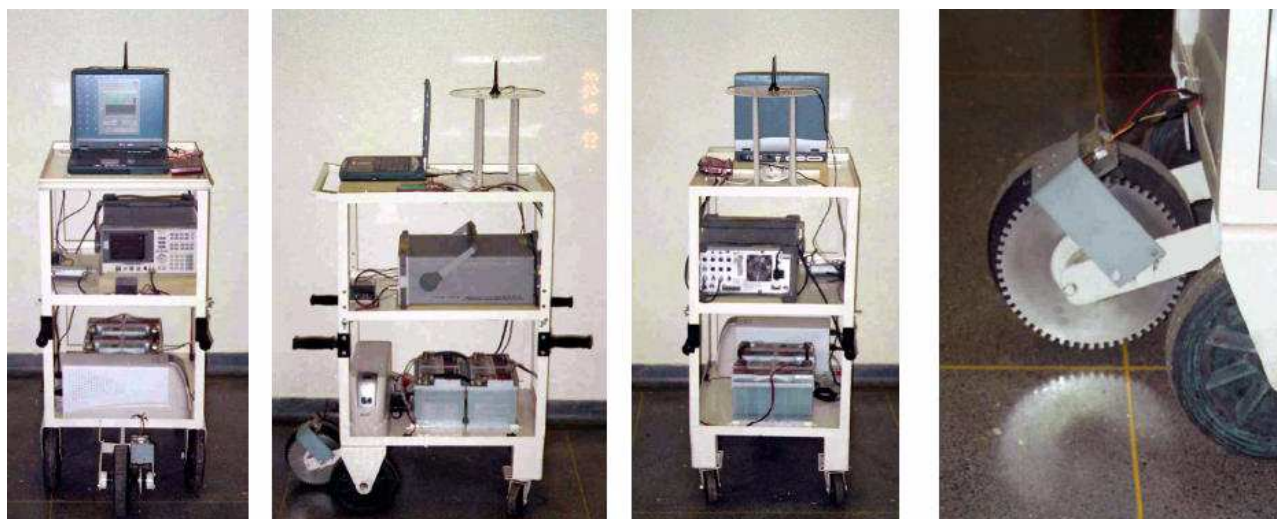


Fig. A.1: EADMEC.

Apêndice B

Pós-processamento do sinal – Código-fonte do programa

Este apêndice fornece o código-fonte em MatLab do programa de computador que calcula a média móvel (*moving average*) e os desvanecimentos lento e rápido.

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%PROGRAMA
validos=0;
descartados=0;
t=0;
med=0;
cont=0;
i=1;
clear sinal;%valores de nível de sinal em mW
clear sinalplot;%valores de nível de sinal em dBm
clear S;
clear R;
clear M;
temp='111';
tempant='';
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
path='d:\ugo\';
nomearq=input('\nEntre com o nome do arquivo    -> ');
nomearquivo=strcat(path,'\ ',nomearq,'.txt');
fid=fopen(nomearquivo,'r'); %abre o arquivo
while 1
    med=med+1;
    if cont<6
        cont=cont+1;
        linha = fgetl(fid);
        disp(linha)
```

```
else
    linhaindes=fgets(fid,34);

    if linhaindes ~= -1
        string=fgets(fid,26);
        tempant=temp;
        temp=str2num(string);
        t=t+1;
        if ~isempty(temp),
            if and(temp>(-122.00),temp<(-20.00))
                sinalplot(i)=temp;
                i=i+1;
                validos=validos+1;
            else
                descartados=descartados+1;
            end
        else
            if ~isempty(tempant)
                i=i-1;
                validos=validos-1;
                if i==0
                    i=1;
                end
            end
        end
    end
else
    break
end

end
if ~isstr(linha), break, end
end
fclose(fid);
sinalplot=sinalplot';
Valor_minimo=min(sinalplot);
Valor_maximo=max(sinalplot);
Diferenca=max(sinalplot)-min(sinalplot);
save(strcat(path,'\','dados filtrados','\ ',nomearq),'sinalplot');
sinal=10.^(sinalplot/10);
```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Calcula a média móvel (moving average), o desvanecimento lento e
rapido
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
temp=input('\nEntre com o tamanho da janela móvel (enter=450)--> ');
if isempty(temp)
    temp=450;
end
k=round((temp-1)/2);
S=sinalplot;
M=zeros(length(sinal)-temp,1);
R=zeros(length(sinal)-temp,1);
Splot=S(k+1:length(S)-k);
Sm=10.^(S./10);
j=1;
for i=k+1:length(S)-k,

    M(j)=10*log10(mean(Sm(i-k:i+k))); %valor em dBm - Desvanecimento
Lento
    R(j)=S(i)-M(j); %valor em dB (dBm - dBm) - Desvanecimento Rapido
    j=j+1;
end
save(strcat(path,'dados filtrados','\ ',nomearq),'R');
fid = fopen(strcat(path,'dados filtrados','\R_',nomearq,'.txt'),'w');
fprintf(fid,'%6.4f\n',R);
fclose(fid);
mediasinal=10*log10(mean(10.^(M./10))); %valor em dBm
Valor_maximo
Valor_minimo
Diferenca
descartados
mediasinal

```