



UNICAMP

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO**

HERMANO BARROS TERCIVS

**DISTRIBUIÇÕES GENERALIZADAS DE DESVANECIMENTO DE
CURTO PRAZO: MEDIÇÕES DE CAMPO E VALIDAÇÕES**

Campinas
2008

HERMANO BARROS TERCIVS

**DISTRIBUIÇÕES GENERALIZADAS DE DESVANECIMENTO DE
CURTO PRAZO: MEDIÇÕES DE CAMPO E VALIDAÇÕES**

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. Área de concentração: **Telecomunicações**.

Orientador: Prof. Dr. Michel Daoud Yacoub

Co-orientador: Dr. José Cândido Silveira Santos Filho

Campinas
2008

HERMANO BARROS TERCIVS

**DISTRIBUIÇÕES GENERALIZADAS DE DESVANECIMENTO DE
CURTO PRAZO: MEDIÇÕES DE CAMPO E VALIDAÇÕES**

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. Área de concentração: **Telecomunicações**.

Orientador: Prof. Dr. Michel Daoud Yacoub

Co-orientador: Dr. José Cândido Silveira Santos Filho

BANCA EXAMINADORA

Michel Daoud Yacoub, Ph. D. DECOM/FEEC/UNICAMP
Renato Rocha Lopes, Ph.D. DECOM/FEEC/UNICAMP
Omar Carvalho Branquinho, Ph.D. PUC CAMPINAS

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

B278d Barros Tercius, Hermano
Distribuições generalizadas de desvanecimento de
curto prazo: medições de campo e validações / Hermano
Barros Tercius. --Campinas, SP: [s.n.], 2008.

Orientadores: Michel Daoud Yacoub, José Cândido
Silveira Santos Filho.

Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de
Computação.

1. Radio - Transmissores e transmissão -
Desvanecimento. 2. Probabilidade de tempo. 3.
Distribuição (Probabilidade). 4. Sistemas de
telecomunicações. 5. Analise de regressão. I. Yacoub,
Michel Daoud . II. Santos Filho, José Cândido Silveira
Santos. III. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. IV.
Título.

Título em Inglês: Generalized short term fading distributions: field
measurements and validations

Palavras-chave em Inglês: Fading, Probability distributions,
Telecommunications systems, Weibull

Área de concentração: Telecomunicações e Telemática

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: Renato Rocha Lopes, Omar Carvalho Branquinho

Data da defesa: 05/12/2008

Programa de Pós Graduação: Engenharia Elétrica

COMISSÃO JULGADORA - TESE DE MESTRADO

Candidato: Hermano Barros Tercius

Data da Defesa: 5 de dezembro de 2008

Título da Tese: "Distribuições Generalizadas de Desvanecimento de Curto Prazo: Medições de Campo e Validações"

Prof. Dr. Michel Daoud Yacoub (Presidente): _____

Prof. Dr. Omar Carvalho Branquinho: _____

Prof. Dr. Renato da Rocha Lopes: _____

A meus avós, Hermano e Leocádio, *in*
memoriam

Agradecimentos

Ao Professor Michel, pela extraordinária orientação.

Ao amigo e co-orientador Cândido, por toda sua colaboração nessa dissertação, bem como por sua grande amizade desde o início da graduação.

Ao amigo Fábio, por ter me aceitado como parceiro de trabalho, e pela companhia e incentivo nos dois anos juntos nas medições em campo.

Aos amigos do laboratório Wisstek, em especial a Álvaro, Daniel, Gustavo, Ugo e Yusef, pela prazerosa convivência e por toda ajuda prestada para a produção deste trabalho.

Aos meus pais, Hermano e Edésia, pelo constante incentivo e suporte em toda minha jornada acadêmica e profissional.

À minha esposa, Lorena, por ter abdicado – com pouca reclamação – de muitos fins-de-semana e de algumas férias, no período de elaboração desta dissertação.

A toda minha família e amigos, pelo constante apoio, e por aceitarem e entenderem as minhas justificativas de ausências por estar envolvido neste trabalho.

À CAPES, pelo apoio financeiro.

“O maior erro que um homem pode cometer é viver com
medo de cometer um erro”.

Hebbard

“A perfeição se consegue no fim, não quando não há nada
que agregar, mas sim quando já não há nada o que obter”.

Antoine de Saint-Exupéry

Resumo

Esta dissertação provê uma comparação detalhada entre diversas distribuições de desvanecimento de curto prazo, que são trabalhadas de forma a propiciar seus melhores ajustes para dados obtidos a partir de medições de campo. Tais distribuições incluem aquelas já bem conhecidas na literatura – como Rayleigh, Rice, Nakagami, Hoyt e Weibull – bem como dois modelos propostos recentemente, especificamente κ - μ e η - μ . Primeiramente, é apresentado um embasamento teórico sobre estas distribuições. Em seguida, são fornecidos todos os detalhes da construção e dos ajustes dos parâmetros do aparato de medições, bem como os procedimentos de coleta dos dados. Então, os diversos resultados das medições são analisados. As análises são baseadas em um vasto espaço amostral, englobando 300 ambientes investigados. Sob a óptica de uma de jornada de medição tão ampla, é possível recomendar o uso adequado destas distribuições recém-propostas, nomeadamente κ - μ e η - μ . Pelos resultados obtidos, pode-se constatar que uma melhora significativa no processo de ajuste de curva é obtida com a utilização destas distribuições, as quais podem ser úteis para uma modelagem adequada do ambiente de propagação das comunicações sem fio.

Palavras-chave: Desvanecimento, distribuições de probabilidade, Rayleigh, Rice, Nakagami, Hoyt, Weibull, medidas de campo.

Abstract

This thesis provides a thorough comparison among the various short term fading distributions, which are handled so as to give their best fit over data obtained from field measurements. Such distributions include those already well known in the literature – namely Rayleigh, Rice, Nakagami, Hoyt e Weibull – as well as two recently proposed models, namely κ - μ and η - μ . Firstly, some theoretical background concerning these distributions are given. Then, the details of the construction and required parameters adjustments of the measurement apparatus as well as the data collection procedures are shown. Then, the various results of the measurements are analysed. The analyses are based on an ample sample space, encompassing 300 surveying sites. In the view of such a vast measurement campaign, it may be possible to recommend the adequate use of those newly proposed distributions, namely κ - μ e η - μ . From our results, it is possible to see that a significant improvement in the curve fitting process can be seen with the use of these distributions, which may be useful for the adequate modelling of the wireless communications propagation environment.

Keywords: Fading, probability distributions, Rayleigh, Rice, Nakagami, Hoyt, Weibull, field measurements.

Lista de Figuras

Figura 3.1 – Função densidade de probabilidade κ - μ para um μ fixo ($\mu = 0.5$).	15
Figura 3.2 – Função densidade de probabilidade κ - μ para um κ fixo ($\kappa = 1$).	16
Figura 3.3 – Função de distribuição cumulativa κ - μ para o parâmetro Nakagami $m = 1.25$	16
Figura 3.4 – Distribuições de desvanecimento englobadas pela κ - μ	18
Figura 3.5 – Função densidade de probabilidade η - μ para um μ fixo ($\mu = 0.6$).	21
Figura 3.6 – Função densidade de probabilidade η - μ para um η fixo ($\eta = 0.5$).	21
Figura 3.7 – Função de distribuição cumulativa η - μ para o mesmo parâmetro Nakagami $m = 0.75$	22
Figura 3.8 – Distribuições de desvanecimento englobadas pela η - μ	24
Figura 3.9 – Funções de distribuição cumulativas κ - μ e η - μ com relação à Nakagami ($m = 1.25$).	26
Figura 3.10 – Modelos físicos das distribuições de desvanecimento.	27
Figura 4.1 – Diagrama de blocos do EADMEC.	30
Figura 4.2 – Roda dentada do EADMEC.	31
Figura 4.3 – Curva de resposta do EADMEC.	36
Figura 4.4 – Interface do software com o usuário.	40
Figura 4.5 – Visão frontal do EADMEC.	42
Figura 4.6 – Visão lateral do EADMEC.	43
Figura 4.7 – Visão traseira do EADMEC.	43
Figura 4.8 – Localização do transmissor nas medições <i>Into Buildings</i>	45
Figura 4.9 – Diagrama do sistema de transmissão nas medições <i>Into Buildings</i>	46
Figura 4.10 – FEEC/Bloco F.	48
Figura 4.11 – FEEC/Oficina.	49

Figura 4.12 – FEEC/Bloco G2.	49
Figura 4.13 – FEEC/Pós Graduação.	50
Figura 4.14 – FEEC/Demic.	50
Figura 4.15 – FEQ/Bloco C.	51
Figura 4.16 – FEQ/Bloco D.	51
Figura 4.17 – FEM/Bloco A.	52
Figura 4.18 – Ciclo Básico II.	52
Figura 4.19 – Ginásio de esportes (vista externa).	53
Figura 4.20 – Ginásio de esportes (vista interna).	53
Figura 4.21 – FEC/Salas de aula.	54
Figura 4.22 – Exemplo de arquivo com medidas.	56
Figura 4.23 – Exemplo de desvanecimento lento do sinal.	57
Figura 4.24 – Exemplo de desvanecimento rápido do sinal.	57
Figura 4.25 – Comparação do tamanho da janela em ambiente de medição <i>Into Buildings</i>	59
Figura 4.26 – Comparação do tamanho da janela em ambiente de medição <i>Within Buildings</i>	60
Figura 5.1 – Ajuste FEEC/Bloco F/FE13, medições <i>Into Buildings</i>	77
Figura 5.2 – Ajuste FEEC/Pós-graduação/Corredor direito (2º andar), medições <i>Into Buildings</i>	78
Figura 5.3 – Ajuste FEEC/Oficina, medições <i>Into buildings</i>	78
Figura 5.4 – Ajuste FEEC/Bloco G2/Sala 3, medições <i>Into Buildings</i>	79
Figura 5.5 – Ajuste FEEC/Demic/Sala24, medições <i>Into Buildings</i>	79
Figura 5.6 – Ajuste Ginásio/ginásio 300k, medições <i>Into Buildings</i>	80
Figura 5.7 – Ajuste Ciclo Básico II/PB05, medições <i>Into Buildings</i>	80
Figura 5.8 – Ajuste FEC/Salas de aula/PG02, medições <i>Into Buildings</i>	81
Figura 5.9 – Ajuste FEQ/Bloco C/Corredor processos, medições <i>Into Buildings</i>	81

Figura 5.10 – Ajuste FEQ/Bloco D/corredor salas, medições <i>Into Buildings</i>	82
Figura 5.11 – Ajuste FEM/Bloco A/EM22, medições <i>Into Buildings</i>	82
Figura 5.12 – Ajuste FEEC/Bloco F/FE23, medições <i>Within Buildings</i>	89
Figura 5.13 – Ajuste FEEC/Pós-graduação/PE32, medições <i>Within Buildings</i>	90
Figura 5.14 – Ajuste FEEC/Oficina, medições <i>Within Buildings</i>	90
Figura 5.15 – Ajuste FEEC/Bloco G2/Sala 3, medições <i>Within Building</i>	91
Figura 5.16 – Ajuste FEEC/Demic/Sala 26, medições <i>Within Buildings</i>	91
Figura 5.17 – Ajuste Ginásio/ginasiomeio, medições <i>Within Buildings</i>	92
Figura 5.18 – Ajuste Ciclo Básico II/PB13, medições <i>Within Buildings</i>	92
Figura 5.19 – Ajuste FEC/Salas de aula/Corredor lateral (1° andar), medições <i>Within Buildings</i>	93
Figura 5.20 – Ajuste FEQ/Bloco C/Corredor labs (1° andar), medições <i>Within Buildings</i>	93
Figura 5.21 – Ajuste FEQ/Bloco D/Lab2, medições <i>Within Buildings</i>	94
Figura 5.22 – Ajuste FEM/Bloco A/EM32, medições <i>Within Buildings</i>	94
Figura 5.23 – Ajuste adequado das distribuições tradicionais.	101
Figura 5.24 – Ajuste ruim das distribuições Nakagami e Weibull.	102
Figura 5.25 – Ajuste melhor das distribuições Nakagami e Weibull.	102
Figura 5.26 – Ambiente de medição com comportamento típico do modelo κ - μ	105
Figura 5.27 – Ambiente com ajuste ruim pela distribuição κ - μ	106

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Obtenção de outras distribuições de desvanecimento a partir da κ - μ	19
Tabela 3.2 – Obtenção de outras distribuições de desvanecimento a partir da η - μ	25
Tabela 4.1 – Descrição dos edifícios onde foram realizadas as medições.	47
Tabela 5.1 – Erro percentual médio para o prédio FEEC/Bloco F, medições <i>Into Buildings</i>	71
Tabela 5.2 – Erro percentual médio para o prédio FEEC/Pós-graduação, medições <i>Into Buildings</i>	72
Tabela 5.3 – Erro percentual médio para o prédio FEEC/Oficina, medições <i>Into Buildings</i>	72
Tabela 5.4 – Erro percentual médio para o prédio FEEC/Bloco G2, medições <i>Into Buildings</i>	73
Tabela 5.5 – Erro percentual médio para o prédio FEEC/Demic, medições <i>Into Buildings</i>	73
Tabela 5.6 – Erro percentual médio para o prédio Ginásio, medições <i>Into Buildings</i>	73
Tabela 5.7 – Erro percentual médio para o prédio Ciclo Básico II, medições <i>Into Buildings</i>	74
Tabela 5.8 – Erro percentual médio para o prédio FEC/Salas de aula, medições <i>Into Buildings</i>	74
Tabela 5.9 – Erro percentual médio para o prédio FEQ/Bloco C, medições <i>Into Buildings</i>	75
Tabela 5.10 – Erro percentual médio para o prédio FEQ/Bloco D, medições <i>Into Buildings</i>	76
Tabela 5.11 – Erro percentual médio para o prédio FEM/Bloco A, medições <i>Into Buildings</i>	76
Tabela 5.12 – Erro percentual médio para o prédio FEEC/Bloco F, medições <i>Within Buildings</i>	83
Tabela 5.13 – Erro percentual médio para o prédio FEEC/Pós-graduação, medições <i>Within Buildings</i>	83
Tabela 5.14 – Erro percentual médio para o prédio FEEC/Oficina, medições <i>Within Buildings</i>	84

Tabela 5.15 – Erro percentual médio para o prédio FEEC/Bloco G2, medições <i>Within Buildings</i>	84
Tabela 5.16 – Erro percentual médio para o prédio FEEC/Demic, medições <i>Within Buildings</i>	85
Tabela 5.17 – Erro percentual médio para o prédio Ginásio, medições <i>Within Buildings</i>	85
Tabela 5.18 – Erro percentual médio para o prédio Ciclo Básico II, medições <i>Within Buildings</i>	85
Tabela 5.19 – Erro percentual médio para o prédio FEC/Salas de Aula, medições <i>Within Buildings</i>	86
Tabela 5.20 – Erro percentual médio para o prédio FEQ/Bloco C, medições <i>Within Buildings</i>	87
Tabela 5.21 – Erro percentual médio para o prédio FEQ/Bloco D, medições <i>Within Buildings</i>	87
Tabela 5.22 – Erro percentual médio para o prédio FEM/Bloco A, medições <i>Within Buildings</i>	88
Tabela 5.23 – Médias dos erros percentuais médios no total das medições.	95
Tabela 5.24 – Comparação das distribuições tradicionais por quantidade de ambientes com melhor ajuste.	96
Tabela 5.25 – Médias das diminuições dos erros no total das medições.	98
Tabela 5.26 – Médias dos aumentos dos erros relativos médios, no total das medições, tomando os erros das distribuições μ como padrão.	98
Tabela 5.27 – Diminuições dos erros percentuais médios no total das medições.	99
Tabela 5.28 – Utilização das distribuições μ por tipo de medida.	103
Tabela 5.29 – Divisão das faixas de diminuições dos erros pelas distribuições μ	104
Tabela 5.30 – Quantidade de ambientes com $\varepsilon < 10\%$	107

Lista de Siglas

EADMEC – Equipamento de Aquisição de Dados Modular Espacialmente Controlado

LED – Diodo Emissor de Luz

TTL – Lógica Transistor-Transistor

VDC – Voltagem corrente contínua

RF – Rádio Frequência

UHF – Frequência Ultra Alta

LNA – Amplificador de baixo ruído

VBW – Largura de faixa de vídeo

BW – Largura de faixa

RAM – Memória de acesso aleatório

DC – Corrente contínua

AC – Corrente Alternada

FEEC – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

EIRP – Potência Isotrópica Efetivamente Irradiada

FEQ – Faculdade de Engenharia Química

FEM – Faculdade de Engenharia Mecânica

FEC – Faculdade de Engenharia Civil

PDF – Função Densidade de Probabilidade

CDF – Função de Distribuição Cumulativa

Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	01
1.1	FENÔMENOS DE PROPAGAÇÃO.....	02
1.1.1	Perda de percurso.....	02
1.1.2	Desvanecimento lento.....	03
1.1.3	Desvanecimento rápido.....	03
1.2	OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO.....	04
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	06
2	DISTRIBUIÇÕES TRADICIONAIS.....	07
2.1	DISTRIBUIÇÃO RAYLEIGH.....	07
2.2	DISTRIBUIÇÃO RICE.....	09
2.3	DISTRIBUIÇÃO NAKAGAMI.....	10
2.4	DISTRIBUIÇÃO HOYT.....	11
2.5	DISTRIBUIÇÃO WEIBULL.....	12
2.6	CONCLUSÕES.....	13
3	DISTRIBUIÇÕES κ-μ e η-μ.....	14
3.1	DISTRIBUIÇÃO κ - μ	15
3.1.1	Modelo físico.....	17
3.1.2	Relação com outras distribuições.....	17
3.1.3	Aplicação da distribuição κ - μ	19
3.2	DISTRIBUIÇÃO η - μ	20
3.2.1	Modelo físico.....	22
3.2.2	Relação com outras distribuições.....	23
3.2.3	Aplicação da distribuição η - μ	25

3.3 A DISTRIBUIÇÃO κ - μ e A DISTRIBUIÇÃO η - μ	26
3.4 CONCLUSÕES.....	28
4 MEDIÇÕES.....	29
4.1 EQUIPAMENTO DE MEDIÇÕES.....	30
4.1.1 Amostrador espacial.....	31
4.1.2 Medidor do sinal.....	35
4.1.3 Adquiridor de dados.....	38
4.1.4 Fornecedor de Energia.....	41
4.2 PROCEDIMENTOS DE MEDIÇÕES.....	44
4.2.1 Tipos de medições quanto à localização do transmissor.....	44
4.2.2 Descrição dos prédios escolhidos.....	47
4.2.3 Obtenção dos dados.....	54
4.2.4 Filtragem dos dados.....	55
4.3 CONCLUSÕES.....	61
5 RESULTADOS.....	62
5.1 DEFINIÇÕES SOBRE A APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	63
5.1.1 Espaço amostral e trabalhos anteriores.....	63
5.1.2 Apresentação dos pontos.....	65
5.1.3 Estatística analisada.....	65
5.1.4 Distribuições.....	66
5.1.5 Comparação quantitativa.....	66
5.1.6 Comparação qualitativa.....	69
5.1.7 Ajuste das distribuições μ	70
5.1.8 Estrutura das tabelas.....	70
5.2 MEDIÇÕES <i>INTO BUILDINGS</i>	71

5.2.1 Resultados quantitativos.....	71
5.2.2 Resultados qualitativos.....	77
5.3 MEDIÇÕES <i>WITHIN BUILDINGS</i>	83
5.3.1 Resultados quantitativos.....	83
5.3.2 Resultados qualitativos.....	89
5.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	95
5.5 CONCLUSÕES.....	108
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	110
6.1 INVESTIGAÇÕES FUTURAS.....	111
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	112
A ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS.....	116

Trabalhos Publicados pelo Autor

1. TERCIUS, H. B.; YACOUN, M. D.; CROCOMO, L. F.; KRETLY, L. C.; MARTINS, F. C.; TOLEDO, A. F. **EADMEC - Equipamento de Aquisição de Dados Modular Espacialmente Controlado.** *Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia*, COBENGE 2003, Rio de Janeiro, RJ, Setembro de 2003.
2. MARTINS, F. C.; TERCIUS, H. B.; YACOUN, M. D. **Validating The κ - μ Distribution and The η - μ Distribution.** *International Workshop on Telecommunications, IWT 2004*, Santa Rita do Sapucaí, MG, Brasil, Agosto de 2004.
3. YACOUN, M. D.; FRAIDENRAICH, G.; TERCIUS, H. B.; MARTINS, F. C. **The Asymmetrical η - κ Distribution.** *International Workshop on Telecommunications, IWT 2004*, Santa Rita do Sapucaí, MG, Brasil, Agosto de 2004; publicado também em *SBrT/IEEE Journal of Communication and Information Systems*, vol. 20, no. 3, pp. 182-187, Dezembro de 2005.
4. MARTINS, F. C.; TERCIUS, H. B.; YACOUN, M. D. **Medidas de banda estreita em 1800MHz e as distribuições gerais de desvanecimento κ - μ e η - μ .** *XXI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*, SBrT'04, Belém, PA, Setembro de 2004.
5. YACOUN, M. D.; FRAIDENRAICH, G.; TERCIUS, H. B.; MARTINS, F. C. **The Symmetrical η - κ Distribution.** *IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Communications*, PIMRC 2004, Barcelona, Espanha, Setembro de 2004.
6. YACOUN, M. D.; FRAIDENRAICH, G.; TERCIUS, H. B.; MARTINS, F. C. **The Symmetrical η - κ Distribution: a general fading distribution.** *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 51, no. 4, pp. 504-511, Dezembro de 2005.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Os sistemas de comunicação sem fio sempre ocuparam lugar de destaque no mercado de telecomunicações. Nas últimas décadas, o desenvolvimento de tecnologias que contemplam a mobilidade dos terminais de comunicação proporcionou um crescimento vertiginoso de tais sistemas, tornando-os parte integrante do dia-a-dia de quase todas as pessoas. O maior exemplo disto é o sistema móvel pessoal, ou sistema móvel celular, para o qual estima-se existirem hoje mais de 3 bilhões de terminais ativos [1].

Com a mobilidade, o estudo detalhado das características de propagação do sinal rádio-móvel tornou-se imprescindível, já que elas afetam drasticamente os custos de provimento dos serviços de comunicação sem fio. Se, por exemplo, o sinal de rádio encontrar dificuldade em adentrar por edificações, haverá necessidade de um maior número de estações em áreas com maior densidade de edificações. Obviamente, para usuário final, isso se refletirá na elevação dos preços da utilização destes serviços.

A propagação do sinal rádio-móvel é afetada por alguns fenômenos: a) perda de percurso; b) desvanecimento de longo prazo ou lento; e c) desvanecimento de curto prazo ou rápido. Entre estes, o que apresenta mais dificuldade – e, conseqüentemente, também mais lacunas – de modelagem é o desvanecimento rápido. Apesar de desde o início do século passado já existirem distribuições probabilísticas para descrever a variação rápida de um sinal de desvanecimento, aqui chamadas de distribuições tradicionais, todas estas se baseiam em modelos físicos muito simplificados. Considerava-se que simplificações assim fossem “suficientemente boas para problemas de engenharia [2]” e, em muitos casos, elas de fato o são. No entanto, ao longo dos anos, resultados experimentais têm sido usados para questionar tal consideração [3]. Mais do que isso, as redes móveis estão em rápida evolução. Elas já integram áudio, vídeo e dados, oferecendo uma gama de serviços com total flexibilidade e transparência para o usuário. Sendo assim, são necessárias altas taxas de transmissão e,

consequentemente, são maiores as restrições para o funcionamento das redes. Portanto, o que era uma simplificação “suficientemente boa” pode ter deixado de ser.

Visando prover mais generalização – ou seja, menos simplificações – para os antigos modelos, duas novas distribuições de desvanecimento foram propostas recentemente em [4] e [5], as distribuições κ - μ e η - μ , doravante chamadas de distribuições μ . Tais distribuições apresentam um modelo mais preciso para o fenômeno de desvanecimento, como observado experimentalmente em [6] e [7]. Por outro lado, suas expressões matemáticas são bem mais complexas e, portanto, mais difíceis de serem manipuladas. Isto levou alguns pesquisadores a questionar (durante a apresentação de [6]) o real benefício do uso prático das distribuições μ . Para responder a esta questão, esta dissertação compara detalhadamente, por meio de resultados experimentais exaustivos, o desempenho das distribuições de desvanecimento tradicionais com o das distribuições κ - μ e η - μ .

1.1 FENÔMENOS DE PROPAGAÇÃO

A propagação do sinal rádio-móvel está sujeita à combinação de três fenômenos que o degradam: perda de percurso, 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 a atenuação sofrida pelo sinal ao longo do percurso entre transmissor e receptor. Esta atenuação é resultado de alguns fatores, tais como a frequência de operação e a distância entre transmissor e receptor, entre outros. As variações e atenuações em grande escala são observáveis através de grandes distâncias (dezenas de metros).

1.1.2 Desvanecimento lento

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. Este tipo de desvanecimento também é conhecido como 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, na qual o nível de sinal é menor. O desvanecimento lento determina a variação da média global do sinal recebido e ocorre em intervalos de dezenas de comprimento de onda. Dentre os modelos utilizados para a caracterização das flutuações lentas do sinal, o mais utilizado é a distribuição lognormal [8], independentemente da distância entre transmissor e receptor [9].

1.1.3 Desvanecimento rápido

O desvanecimento rápido é causado pelo comportamento aleatório das componentes de onda 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 fases. Esse tipo de desvanecimento caracteriza a variação da média local do sinal e ocorre em intervalos de aproximadamente meio comprimento de onda. Os modelos tradicionalmente utilizados para a caracterização das flutuações rápidas do sinal são as distribuições de Rayleigh, Hoyt, Rice, Nakagami e Weibull.

1.2 OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

O objetivo desta dissertação é validar e comparar diversos modelos estatísticos utilizados para descrever a variação de pequena escala, ou rápida, de um sinal de desvanecimento. Neste sentido, são propostas as seguintes contribuições:

- **Técnicas de medição de campo:** Serão apresentados todos os detalhes da construção do aparato de medição, das configurações que precisam ser feitas – inclusive revelando as marcas e modelos dos equipamentos utilizados – dos limites que devem ser respeitados e das relações entre as grandezas variáveis, registrando-se assim o conhecimento necessário para a construção de outros equipamentos de medições e para a realização de experimentos semelhantes por outros pesquisadores, ou até mesmo, como abordado em [10], para a elaboração de uma disciplina de laboratório em comunicações sem fio. Este tipo de detalhamento não havia sido apresentado antes na literatura e visa propiciar a outros pesquisadores uma diminuição do grande tempo usualmente despendido para se montar e ajustar um aparato de medição.
- **Resultados experimentais:** As análises e conclusões apresentadas neste trabalho são baseadas em dados experimentais. Apesar de resultados de simulação serem úteis para possibilitar análises preliminares, somente dados experimentais podem validar um modelo físico. No entanto, talvez pela dificuldade de realização dos experimentos, os trabalhos que apresentam resultados experimentais são minoria na literatura. Esta dissertação visa enriquecer o acervo.
- **Resultados quantitativos:** Mesmo quando são obtidos dados experimentais para análise de distribuições de desvanecimento, os resultados costumam ser apresentados apenas na forma de gráficos [11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18], constituindo-se em uma comparação qualitativa. Normalmente, tais gráficos permitem concluir qual a melhor distribuição para ajustar cada conjunto de dados. Por outro lado, não permitem afirmar qual o valor exato de erro de cada uma delas. Costuma-se concluir que as distribuições propiciaram um ajuste “adequado”, um ajuste “moderado” ou um ajuste “ruim”. Este trabalho, por sua vez, também inclui uma comparação quantitativa. Aqui serão apresentados os valores de erro para todas as distribuições em cada um dos diversos

ambientes analisados. Portanto, além do valor exato de erro, pode ser avaliada de forma precisa a diferença entre os ajustes de cada distribuição. Apesar de este autor não se furtar a obter conclusões sobre a adequação dos ajustes das diversas distribuições, a apresentação dos resultados quantitativos permite que outros pesquisadores e projetistas tirem suas próprias conclusões com base nas particularidades dos sistemas que estiverem analisando, inclusive futuramente, quando estiverem lidando com sistemas mais avançados, para os quais a tolerância a erros certamente será diferente.

- **Estatísticas de frequência:** Costuma-se fazer análises das distribuições de desvanecimento rápido com poucas unidades de arquivos, usualmente não ultrapassando uma dezena de ambientes medidos [11, 13, 19]. Mesmo com um número maior de arquivos gerados, eles não são obtidos de forma que possa ser feita uma análise individual de cada arquivo para a validação de modelos de desvanecimento rápido, devido, geralmente, à pequena quantidade de medidas por arquivo. Nestes casos, para se gerar um único gráfico comparativo dos modelos de desvanecimento rápido, há necessidade de se unir vários arquivos obtidos, como em [20, 12, 15] (Uma melhor análise das referências sobre medições para validação de distribuições de desvanecimento rápido será feita na seção 5.1.1). Desta forma, tais estudos não podem propiciar conclusões sobre a frequência precisa de ocorrência de algum valor de erro ou do desempenho relativo entre os ajustes. Para uma determinada distribuição, conclui-se, por exemplo, que ela “geralmente” propicia bons ajustes, ou então, que “são observados casos” nos quais o ajuste da distribuição não é adequado. Este tipo de conclusão não é suficiente para determinar o real benefício da utilização prática de algumas distribuições, sobretudo daquelas que possuem expressões mais complexas, como as distribuições κ - μ e η - μ . Neste trabalho foi gerado um espaço amostral sem precedentes no tipo de análise em questão, totalizando quase 300 ambientes. Com isso, será possível determinar, por exemplo, em que percentual de ambientes o ajuste das distribuições μ é significativamente melhor que o das distribuições tradicionais.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O restante desta dissertação está estruturado da seguinte forma:

- Capítulo 2: Descrição resumida das distribuições de desvanecimento tradicionais, com seus respectivos históricos;
- Capítulo 3: Descrição das distribuições κ - μ e η - μ , com foco nos seus modelos físicos e nas suas relações com as distribuições tradicionais;
- Capítulo 4: Detalhamento do equipamento de medição e dos procedimentos utilizados para a realização das medições.
- Capítulo 5: Apresentação dos resultados quantitativos e qualitativos, bem como das análises dos resultados, focadas na comparação das distribuições entre si, sobretudo das distribuições μ com as distribuições tradicionais.
- Capítulo 6: Considerações finais e discussões sobre trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

DISTRIBUIÇÕES TRADICIONAIS

Devido à infinidade e aleatoriedade dos fenômenos envolvidos na composição do canal de comunicação sem fio, este é normalmente modelado de forma estatística, por meio de distribuições de probabilidade. Muitas distribuições têm sido utilizadas para descrever a envoltória do canal. Para a variação lenta, ou de larga escala, destaca-se a distribuição lognormal. Para a variação rápida, ou de pequena escala – foco deste trabalho – têm sido utilizadas diversas distribuições, entre as quais as mais importantes são: Rayleigh, Rice, Nakagami, Hoyt e Weibull, aqui chamadas de distribuições tradicionais.

Este capítulo faz um resumo das distribuições tradicionais, por meio da apresentação do seu histórico, das funções de distribuição de probabilidade e dos estimadores.

É importante destacar que a primeira distribuição a ser proposta foi a Rayleigh e que todas as outras aqui apresentadas são generalizações do seu modelo.

2.1 DISTRIBUIÇÃO RAYLEIGH

Proposta em 1880 por Lord Rayleigh [21], ganhador do prêmio Nobel de física, a distribuição Rayleigh foi inicialmente utilizada na área de eletromagnetismo. Em 1935, Pawsey [22] introduziu a distribuição Rayleigh na modelagem de dados de medidas de potência do sinal de rádio.

O modelo físico da distribuição Rayleigh considera que as componentes em fase e quadratura do sinal são formadas pela soma de um grande número de ondas espalhadas. Sendo assim, pela aplicação do Teorema Central do Limite, tais componentes são modeladas como um processo Gaussiano, cujo módulo corresponde à envoltória do sinal. Além disso, a média de cada componente é nula e suas variâncias são idênticas.

Dado o modelo físico, a envoltória r pode ser escrita em termos das componentes em fase e em quadratura do sinal desvanecido como:

$$r^2 = x^2 + y^2,$$

onde x e y , como já explicado, são processos Gaussianos mutuamente independentes com $E(x) = E(y) = 0$ e $E(x^2) = E(y^2) = \sigma^2$. ($E(.)$ denota média estatística.)

Desta forma, para um sinal desvanecido com envoltória normalizada $\rho = r/\hat{r}$, $\hat{r} = \sqrt{E(r^2)}$ sendo o valor *rms* de r , a função densidade de probabilidade $p(\rho)$ da envoltória Rayleigh normalizada é dada por:

$$p(\rho) = 2\rho \exp(-\rho^2).$$

Mesmo com as simplificações do seu modelo físico, a distribuição Rayleigh tem mostrado bons resultados em um considerável percentual dos resultados experimentais apresentados na literatura, como, por exemplo, em [13]. Ela tem como destaque em relação às outras distribuições a simplicidade de suas expressões. Por exemplo, a função de densidade da envoltória normalizada da distribuição Rayleigh não depende de um parâmetro ou estimador, sendo, portanto, fixa para qualquer conjunto de dados normalizados.

A importância do parâmetro de uma distribuição e de seu respectivo estimador é explicada a seguir. O parâmetro tem o papel de adequar a curva do modelo às características físicas do ambiente em análise. Para tanto, deve ser escolhido um valor numérico apropriado para este parâmetro, de acordo com cada ambiente específico. No ajuste de dados experimentais, este valor deverá resultar na menor distância possível entre a curva da distribuição e os dados obtidos. Para que esta escolha seja perfeita é necessário testar diversos valores para o parâmetro (tantos quanto forem necessários), produzindo um gráfico para cada um destes valores e verificando a adequação dos ajustes resultantes. Contudo, este tipo de procedimento se não inviável, é indesejado, devido ao grande tempo despendido. Por isso, é importante que sejam propostos estimadores para os parâmetros de cada distribuição. Um estimador é uma função dos dados experimentais, com o objetivo de especificar um valor numérico para o parâmetro, que seja adequado aos dados obtidos. Entretanto, em contrapartida à economia de tempo, a estimativa desse valor pode resultar em uma escolha imperfeita. A curva resultante do parâmetro estimado muitas vezes não é a que proporciona o menor desvio possível (de acordo com o modelo em questão) para os dados obtidos. A frequência de ocorrência de estimativas ruins, bem como a distância para o ajuste ótimo, são os fatores que determinam a qualidade do estimador proposto. Uma estimativa ruim pode ser

verificada quando, ao se utilizar um valor numérico de parâmetro diferente do estimado, se obtém um ajuste melhor aos dados experimentais. As ocorrências mais visíveis deste tipo de estimativa são aquelas em que modelos mais generalizados resultam em ajustes piores que o de outros modelos mais restritos. Por exemplo, se o ajuste da distribuição Nakagami resulta em um maior desvio para os dados experimentais que a distribuição Rayleigh, sabemos que certamente existe uma imprecisão na estimativa do parâmetro m de Nakagami, já que o modelo Nakagami inclui o Rayleigh como caso especial. Situações como esta ocorrem frequentemente, como pode ser observado no capítulo 5. Desta forma, podemos afirmar que além da precisão do modelo físico, a qualidade do estimador é um fator responsável pelo desempenho de uma distribuição de desvanecimento no ajuste de dados experimentais.

2.2 DISTRIBUIÇÃO RICE

Em 1944, Rice apresentou um trabalho pioneiro [23] propondo uma distribuição mais geral, conhecida como distribuição Rice, que incluía a distribuição Rayleigh como caso específico. Sua finalidade era a de modelar o efeito do ruído em sistemas FM, também criando diversas métricas e novas estatísticas como ferramentas de análise do sinal de rádio.

O modelo físico da distribuição Rice provê uma generalização em relação ao da Rayleigh: a consideração da existência de uma componente dominante entre as ondas espalhadas formadoras do sinal de desvanecimento. Esta consideração é aplicável, sobretudo, aos casos em que há linha de visada entre transmissor e receptor.

Dado o modelo físico, a envoltória r pode ser escrita em termos das componentes em fase e em quadratura do sinal desvanecido como:

$$r^2 = (x + p)^2 + (y + q)^2,$$

onde x e y são processos Gaussianos mutuamente independentes com $E(x) = E(y) = 0$ e $E(x^2) = E(y^2) = \sigma^2$, e p e q são os valores médios das componentes em fase e em quadratura das ondas de múltiplo percurso.

Desta forma, a função densidade de probabilidade da envoltória Rice normalizada é dada por:

$$p(\rho) = (1+k) \exp(-k) 2\rho \exp(-(1+k)\rho^2) I_0(2\rho\sqrt{k(1+k)}),$$

onde $k = \frac{\sqrt{m^2 - m}}{m - \sqrt{m^2 - m}}$, sendo $m = \frac{1}{\text{Var}(\rho^2)}$, e $I_0(\cdot)$ é a função de Bessel modificada de primeiro tipo e ordem zero.

O destaque da distribuição Rice é ser a única entre as distribuições tradicionais cujo modelo físico considera a existência de linha de visada entre o transmissor e receptor do sinal, uma situação que certamente acontece na prática. Nestes casos, o erro das outras distribuições tradicionais geralmente é muito grande, tornando essencial o uso da distribuição Rice. Por isso, mesmo não ocorrendo com tanta frequência nos sistemas móveis atuais, os ambientes nos quais existe linha de visada afetam muito a média das outras distribuições, o que será demonstrado no capítulo 5. Além disso, a distribuição Rice também possui um estimador eficiente.

2.3 DISTRIBUIÇÃO NAKAGAMI

Em 1960 [2], Minoru Nakagami obteve, de forma experimental, uma distribuição para modelar o fenômeno do desvanecimento de curto prazo. Inicialmente chamada de distribuição m , ela passou a ser chamada de Nakagami- m , ou simplesmente Nakagami, em homenagem ao seu criador.

A generalização no modelo físico da distribuição Nakagami em relação à Rayleigh é a consideração de o sinal ser composto por *clusters* (conjuntos) de ondas de múltiplo percurso, como proposto em [24].

Dado o modelo físico, a envoltória r pode ser escrita em termos das componentes em fase e em quadratura do sinal desvanecido como:

$$r^2 = \sum_{i=1}^m (x_i^2 + y_i^2),$$

onde x_i e y_i – respectivamente as componentes em fase e em quadratura do i -ésimo *cluster*, $1 \leq i \leq m$ – são processos Gaussianos mutuamente independentes com $E(x) = E(y) = 0$ e $E(x^2) = E(y^2) = \sigma^2$.

Desta forma, a função densidade de probabilidade da envoltória Nakagami normalizada é dada por:

$$p(\rho) = \frac{2m^m}{\Gamma(m)} \rho^{2m-1} \exp(-m\rho^2),$$

onde $m = \frac{1}{\text{Var}(\rho^2)}$ e $\Gamma(\cdot)$ é a função gama.

A distribuição Nakagami tem como destaque sua variada gama de aplicações [25], sua facilidade de manipulação e seu bom ajuste à maioria das situações práticas relatadas na literatura. Por isso, ela tem sido uma das distribuições mais estudadas e utilizadas pela comunidade científica.

2.4 DISTRIBUIÇÃO HOYT

Em 1947, Hoyt propôs uma nova distribuição para o módulo de uma variável aleatória Gaussiana [26].

A generalização no modelo físico da distribuição Hoyt é a consideração de que as componentes em fase e em quadratura do sinal de desvanecimento têm potências diferentes.

Dado o modelo físico, a envoltória r pode ser escrita em termos das componentes em fase e em quadratura do sinal desvanecido como:

$$r^2 = x^2 + y^2,$$

onde x e y são processos Gaussianos mutuamente independentes com $E(x) = E(y) = 0$ e $E(x^2) = \sigma_x^2$ e $E(y^2) = \sigma_y^2$. Observe que as variâncias das componentes x e y são arbitrárias.

Desta forma, a função densidade de probabilidade da envoltória Hoyt normalizada é dada por:

$$p(\rho) = \frac{2\rho}{\sqrt{1-b^2}} \exp\left(\frac{-\rho^2}{1-b^2}\right) I_0\left(\frac{\rho^2 b}{1-b^2}\right),$$

onde $b = \sqrt{\frac{1}{m} - 1}$, sendo $m = \frac{1}{\text{Var}(\rho^2)}$.

A distribuição Hoyt provavelmente é aquela que, dentre as distribuições tradicionais aqui apresentadas, menos tem sido utilizada pelos pesquisadores.

2.5 DISTRIBUIÇÃO WEIBULL

Em 1928, Fisher e Tippet [27] propuseram uma distribuição relacionada à teoria dos valores extremos. Em 1939, Waloddi Weibull [28] apresentou a mesma distribuição para calcular o tempo médio de vida útil em máquinas industriais. Somente em 1977 a distribuição foi utilizada, por Shepherd [29], para modelar o canal sem fio. Tal distribuição ficou amplamente conhecida como distribuição Weibull.

A generalização no modelo físico da distribuição Weibull é a consideração de que o sinal se propaga em um ambiente não-linear [30,21]. Sendo assim, sua envoltória é obtida não apenas como módulo da soma das componentes de múltiplo percurso, mas como esse módulo elevado a um certo expoente. Supondo que tal não-linearidade existe na forma de um parâmetro de potência, a envoltória r pode ser escrita como:

$$r^\alpha = x^2 + y^2,$$

onde x e y são processos Gaussianos mutuamente independentes com $E(x) = E(y) = 0$ e $E(x^2) = E(y^2) = \sigma^2$.

Desta forma, a função densidade de probabilidade da envoltória Weibull normalizada é dada por:

$$p(\rho) = \alpha \rho^{\alpha-1} \exp(-\rho^\alpha),$$

onde o parâmetro α pode ser estimado pela raiz da equação transcendental [34]

$$\frac{E^2(r)}{E(r^2)} = \frac{\Gamma^2(1+1/\alpha)}{\Gamma(1+2/\alpha)}.$$

A distribuição Weibull, por ter sido desenvolvida com outro objetivo e só ter proposta de modelo físico bem há pouco tempo [30], é a que passou a ser mais recentemente utilizada para modelar o canal sem fio. Mesmo assim, ela já apresentou bons resultados no ajuste de resultados experimentais [32,33] e tem atraído a atenção de muitos pesquisadores, como, por exemplo, em [34].

2.6 CONCLUSÕES

Neste capítulo foi apresentada uma visão geral das distribuições de probabilidade tradicionalmente usadas para descrever a variação de pequena escala de um sinal de desvanecimento.

Foi descrito o histórico de criação de cada uma das distribuições e mostrado que este assunto atrai a atenção de pesquisadores há muito tempo: desde 1935, quando a distribuição Rayleigh, já proposta desde 1880, foi utilizada para modelar dados de medida de potência do sinal de rádio. Posteriormente, com o objetivo de diminuir suas simplificações, foram propostas diversas generalizações ao modelo Rayleigh: a distribuição Rice, em 1944, a Hoyt, em 1947, a Nakagami, em 1960 e a Weibull, em 1977. Dentre estas, têm destaque a distribuição Nakagami, a mais utilizada entre elas, e a distribuição Weibull, que mais recentemente tem mostrado resultados muito bons no ajuste de dados experimentais. O desempenho mais detalhado de cada destas distribuições será apresentado no capítulo 5.

CAPÍTULO 3

DISTRIBUIÇÕES κ - μ E η - μ

Embora as distribuições de desvanecimento tradicionais, mais especificamente a distribuição Nakagami, já apresentassem, em geral, bons resultados nos ajustes de dados experimentais, eram facilmente encontrados casos em que nenhuma delas funcionava bem para este fim [35], ainda que uma ou outra ainda propiciasse um ajuste moderado. Alguns pesquisadores [3] inclusive questionam a utilização da distribuição Nakagami porque sua cauda (região correspondente aos baixos níveis de envoltória) não se ajusta bem aos dados experimentais.

Por este motivo, a obtenção de novas distribuições continuou sendo alvo dos pesquisadores. Recentemente [5,6], visando prover mais generalização às aproximações dos modelos das distribuições tradicionais, foram propostas duas novas distribuições generalizadas para descrever a variação de pequena escala de um sinal desvanecido: a distribuição κ - μ e a distribuição η - μ .

Estas distribuições foram apresentadas detalhadamente em [36] e serão apenas brevemente descritas neste capítulo. Será dada ênfase aos seus modelos físicos e, sobretudo, à relação que as novas distribuições têm com as distribuições tradicionais, com as quais serão confrontadas experimentalmente no capítulo 5.

As distribuições κ - μ e η - μ , ou simplesmente distribuições μ , serão estudadas em conjunto porque são complementares: enquanto a distribuição κ - μ deve ser utilizada para modelar ambientes com linha de visada entre transmissor e receptor, a distribuição η - μ é adequada para ambientes sem linha de visada. Na prática, se os pontos experimentais estiverem acima do ajuste propiciado pela distribuição Nakagami, utiliza-se a distribuição κ - μ , caso contrário, a η - μ . Esta característica será detalhada nas próximas seções.

3.1 DISTRIBUIÇÃO κ - μ

Para um sinal desvanecido com envoltória r e envoltória normalizada $\rho = r/\hat{r}$, $\hat{r} = \sqrt{E(r^2)}$ sendo o valor *rms* de r , a função densidade de probabilidade $p(\rho)$ da envoltória normalizada κ - μ pode ser escrita como:

$$p(\rho) = \frac{2\mu(1+\kappa)^{\frac{\mu+1}{2}}}{\kappa^{\frac{\mu-1}{2}} \exp(\mu\kappa)} \rho^\mu \exp(-\mu(1+\kappa)\rho^2) I_{\mu-1}(2\mu\sqrt{\kappa(1+\kappa)}\rho), \quad (3.1)$$

onde $\kappa \geq 0$ é a razão entre a potência total das componentes dominantes e a potência total das ondas espalhadas, $\mu \geq 0$ é dado por $\mu = \frac{E^2(r^2)}{\text{Var}(r^2)} \times \frac{1+2\kappa}{(1+\kappa)^2}$ (ou, equivalentemente,

$\mu = \frac{1}{\text{Var}(\rho^2)} \times \frac{1+2\kappa}{(1+\kappa)^2}$), e $I_\nu(\cdot)$ é a função de Bessel modificada de primeiro tipo e ordem arbitrária ν (ν real).

Exemplos de formatos da distribuição κ - μ para diversas configurações dos parâmetros κ e μ são apresentados nas figuras seguintes.

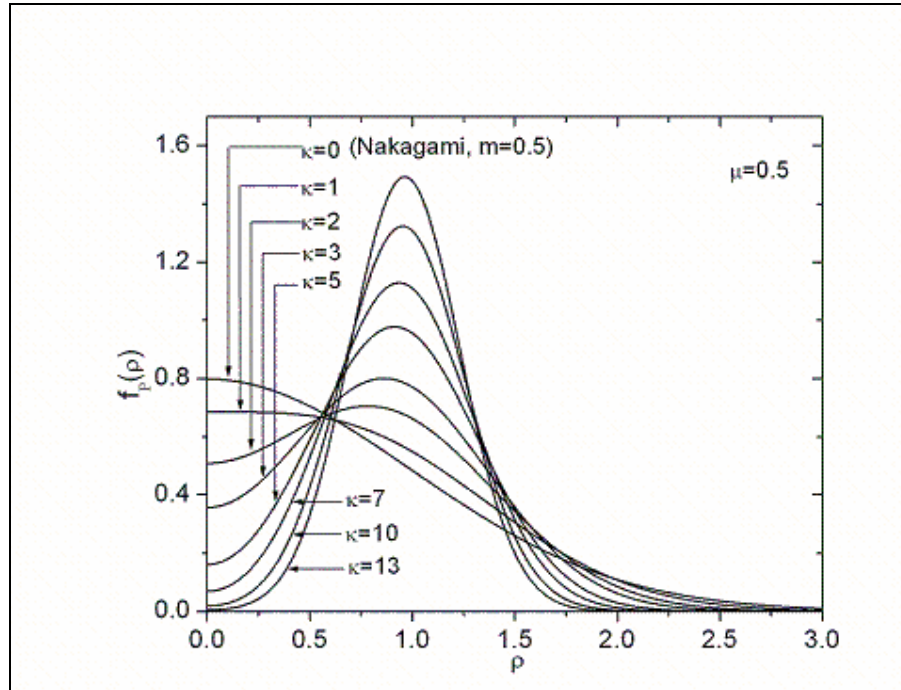


Figura 3.1 – Função densidade de probabilidade κ - μ para um μ fixo ($\mu = 0.5$)

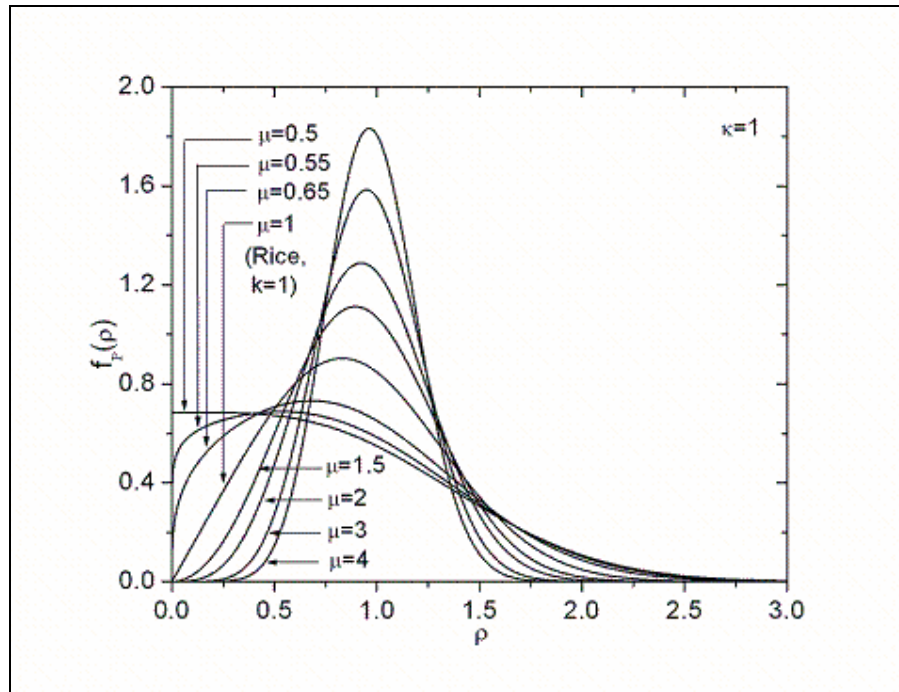


Figura 3.2 – Função densidade de probabilidade κ - μ para um κ fixo ($\kappa = 1$)

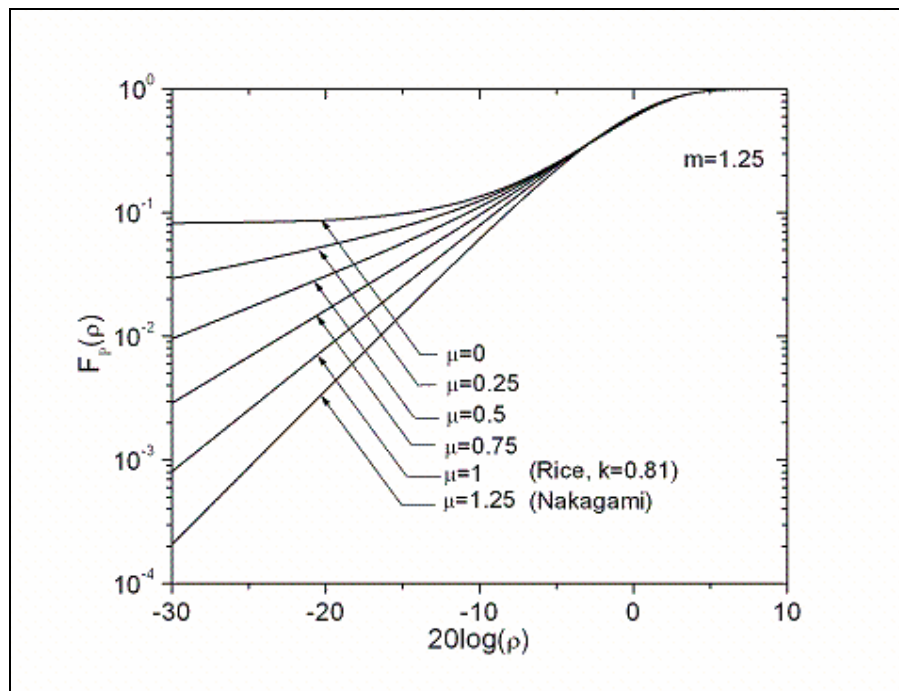


Figura 3.3 – Função de distribuição cumulativa κ - μ para o parâmetro Nakagami $m = 1.25$.

3.1.1 Modelo físico

O modelo de desvanecimento da distribuição κ - μ tem as seguintes considerações principais:

- Sinal composto de *clusters* (conjuntos) de ondas de múltiplo percurso que se propagam em um ambiente não homogêneo;
- É assumido que os *clusters* de ondas de múltiplo percurso têm ondas espalhadas com potências idênticas;
- Dentro de cada *cluster* existe uma componente dominante que apresenta potência arbitrária;

Dado o modelo físico, a envoltória r pode ser escrita em termos das componentes em fase e em quadratura do sinal desvanecido como:

$$r^2 = \sum_{i=1}^n (x_i + p_i)^2 + \sum_{i=1}^n (y_i + q_i)^2,$$

onde x_i e y_i são processos Gaussianos mutuamente independentes com

$$E(x_i) = E(y_i) = 0 \quad \text{e} \quad E(x_i^2) = E(y_i^2) = \sigma^2$$

e p_i e q_i são os valores médios das componentes em fase e em quadratura das ondas de múltiplo percurso do i -ésimo *cluster*.

3.1.2 Relação com outras distribuições

A distribuição κ - μ é uma distribuição generalizada de desvanecimento que engloba as distribuições mais conhecidas: Rice e Nakagami. Estas distribuições, por sua vez, englobam a distribuição Rayleigh e, adicionalmente, a Nakagami- m engloba a Gaussiana unilateral. Portanto, todas estas distribuições podem ser obtidas a partir da distribuição κ - μ . A figura seguinte representa as relações descritas.

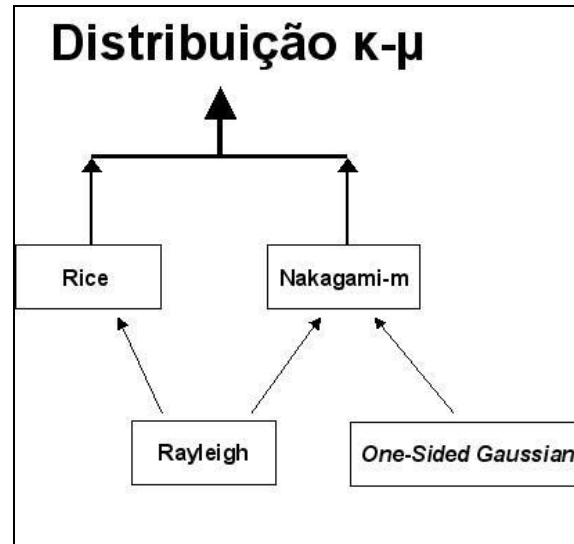


Figura 3.4 – Distribuições de desvanecimento englobadas pela κ - μ .

Rice e Rayleigh

A distribuição Rice descreve um sinal de desvanecimento com um cluster de ondas de múltiplo percurso, no qual uma componente dominante coexiste com as ondas espalhadas. Portanto, ela pode ser obtida a partir da distribuição κ - μ escolhendo-se $\mu=1$ em (3.1). Neste caso, o parâmetro κ coincide com o bem conhecido parâmetro k da distribuição Rice. A partir da distribuição Rice, escolhendo-se $\kappa=k=0$, a distribuição Rayleigh pode ser obtida de maneira exata.

Nakagami, Rayleigh e Gaussiana unilateral

O sinal Nakagami pode ser entendido como sendo composto por *clusters* de múltiplo percurso, sem componente dominante em nenhum *cluster*. Sendo assim, no limite $\kappa \rightarrow 0$ a distribuição κ - μ se torna, de forma exata, a função densidade Nakagami- m , como mostrado em [36]. Agora escolhendo $\mu=m=1$ na distribuição Nakagami- m , obtém-se a distribuição Rayleigh. Da mesma forma, escolhendo $\mu=m=0.5$ em Nakagami- m , obtém-se a distribuição Gaussiana unilateral.

O resumo do que foi descrito nestas duas últimas subseções pode ser visualizado na tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Obtenção de outras distribuições de desvanecimento a partir da κ - μ .

κ	μ	Distribuição κ - μ
$\rightarrow 0$	0.5	Gaussiana unilateral
$\rightarrow 0$	1	Rayleigh
$\rightarrow 0$	m	Nakagami- m
k	1	Rice

3.1.3 Aplicação da distribuição κ - μ

A distribuição κ - μ , como seu próprio nome sugere, é caracterizada por dois parâmetros, κ e μ . Já existem estimadores para estes parâmetros, como apresentado em [36]. Por outro lado, eles ainda não foram validados e, por isso, não serão utilizados neste trabalho. Desta forma, os parâmetros κ e μ serão definidos da maneira explicada a seguir.

Como já definido, os parâmetros κ e μ podem ser expressos em termos do inverso da variância normalizada da potência do sinal de desvanecimento, a qual é usualmente definida como m . Ou seja,

$$m = \frac{\mu(1 + \kappa)^2}{1 + 2\kappa}. \quad (3.2)$$

Neste trabalho, o parâmetro m será estimado a partir dos dados experimentais e os parâmetros κ e μ serão então calculados de modo a satisfazer (3.2) e a propiciar o melhor ajuste aos dados experimentais. Na verdade, um dos parâmetros é escolhido e o outro calculado por (3.2). Não há obrigatoriedade sobre qual dos dois deve ser escolhido. Pode ser qualquer um, desde que sejam respeitadas as restrições específicas de cada parâmetro. Para a escolha de μ , ele deve estar no intervalo $0 \leq \mu \leq m$, para que o valor de κ a ser calculado tenha sentido físico. Já quando κ é escolhido, por se tratar de uma razão entre potências, só faz sentido que ele assuma apenas valores positivos. Neste trabalho, será escolhido o valor de κ . A forma desta escolha é a verificação gráfica, que será explicada na seção 5.1.7. Dado este κ escolhido, μ é calculado de (3.2) como:

$$\mu = \frac{m(1+2\kappa)}{(1+\kappa)^2}. \quad (3.3)$$

3.2 DISTRIBUIÇÃO η - μ

Para um sinal desvanecido com envoltória r e envoltória normalizada $\rho = r/\hat{r}$, $\hat{r} = \sqrt{E(r^2)}$ sendo o valor *rms* de r , a função densidade de probabilidade $p(\rho)$ da envoltória normalizada η - μ pode ser escrita como:

$$p(\rho) = \frac{4\sqrt{\pi}\mu^{\mu+\frac{1}{2}}h^\mu}{\Gamma(\mu)H^{\mu-\frac{1}{2}}} \rho^{2\mu} \exp(-2\mu h\rho^2) I_{\mu-\frac{1}{2}}(2\mu H\rho^2), \quad (3.4)$$

onde $h = \frac{2+\eta^{-1}+\eta}{4}$, $H = \frac{\eta^{-1}-\eta}{4}$, $\mu = \frac{E^2(r^2)}{\text{Var}(r^2)} \times \frac{1+\eta^2}{(1+\eta)^2}$ (ou, equivalentemente,

$\mu = \frac{1}{\text{Var}(\rho^2)} \times \frac{1+\eta^2}{(1+\eta)^2}$), $\Gamma(\cdot)$ é a função Gama, $I_\nu(\cdot)$ é a função de Bessel modificada de

primeiro tipo e ordem arbitrária ν (ν real), $\mu \geq 0$ e $0 \leq \eta \leq 1$. (Como a distribuição é, na verdade, simétrica para $1 \leq \eta < \infty$, poderíamos escrever $0 \leq \eta < \infty$. Porém, esta simetria torna suficiente escolhermos apenas um dos intervalos.)

Exemplos de formatos da distribuição η - μ para diversas combinações dos parâmetros η e μ são apresentados nas figuras seguintes.

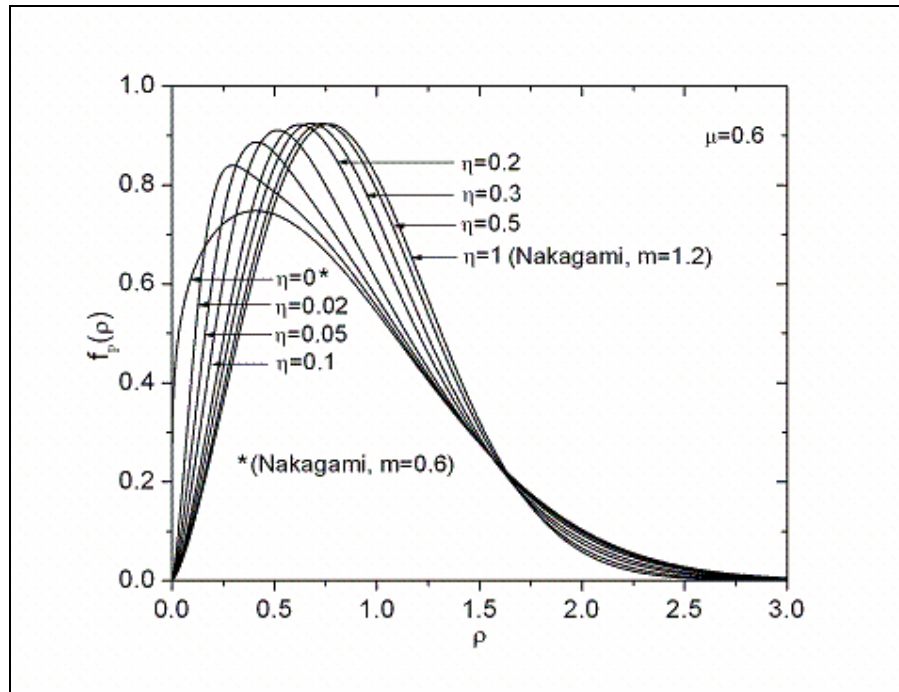


Figura 3.5 – Função densidade de probabilidade η - μ para um μ fixo ($\mu = 0.6$).

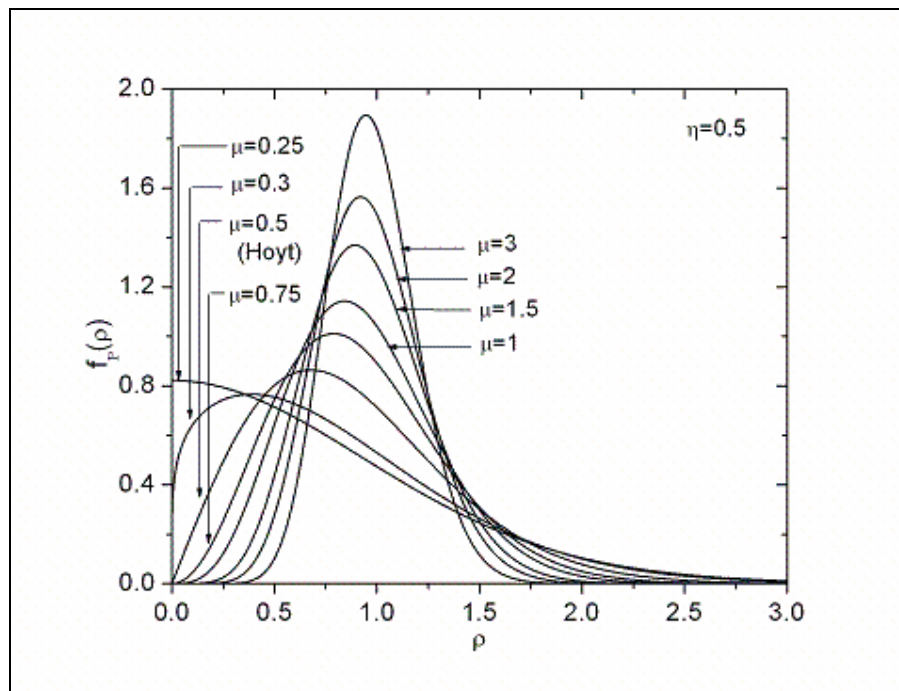


Figura 3.6 – Função densidade de probabilidade η - μ para um η fixo ($\eta = 0.5$).

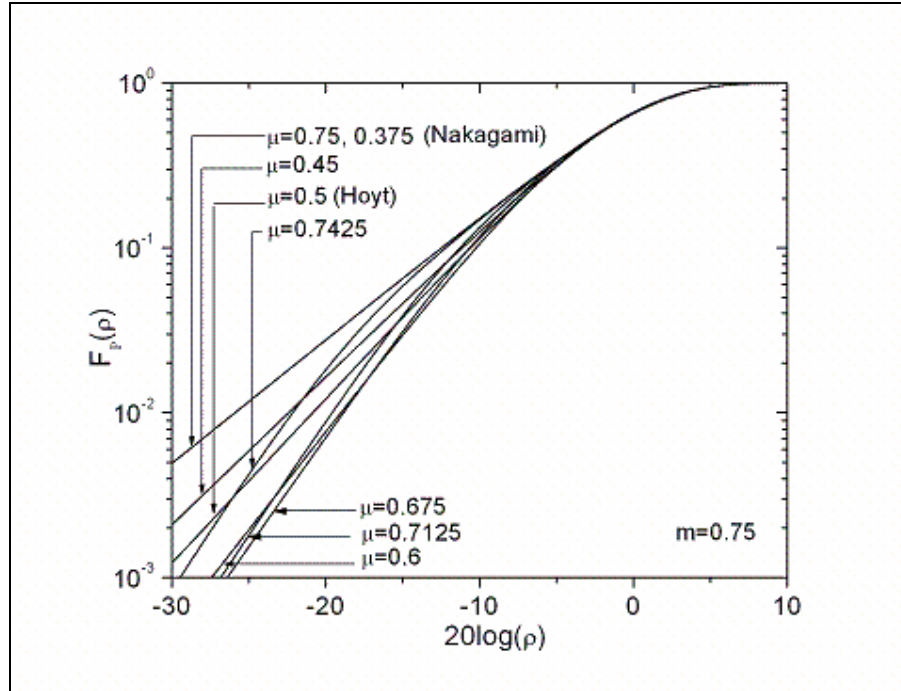


Figura 3.7 – Função de distribuição cumulativa η - μ para o mesmo parâmetro Nakagami $m = 0.75$.

3.2.1 Modelo físico

O modelo de desvanecimento da distribuição η - μ tem as seguintes considerações principais:

- Sinal composto de *clusters* de ondas de múltiplo percurso que se propagam em um ambiente não homogêneo;
- É assumido que as componentes em fase e em quadratura do sinal desvanecido têm potências diferentes;
- Não é considerada a existência de componentes dominantes;

Dado o modelo físico, a envoltória r pode ser escrita em termos das componentes em fase e em quadratura do sinal desvanecido como:

$$r^2 = \sum_{i=1}^n (x_i^2 + y_i^2)$$

onde x_i e y_i são processos Gaussianos mutuamente independentes com

$$E(x_i) = E(y_i) = 0 \quad , \quad E(x_i^2) = \sigma_x^2 \quad \text{e} \quad E(y_i^2) = \sigma_y^2 \quad .$$

Destas equações, definindo-se $\eta = \sigma_x^2 / \sigma_y^2$, podemos obter que

$$\frac{E^2(r^2)}{\text{Var}(r^2)} = \frac{n}{2} \times \frac{(1+\eta)^2}{(1+\eta^2)}. \quad (3.5)$$

Observa-se em (3.5) que $n/2$ pode ser completamente expresso em termos de parâmetros físicos, como o valor médio quadrático da envoltória, variância da potência e potência das componentes em fase e quadratura do sinal desvanecido. Deve-se perceber, também, que apesar de estes parâmetros físicos terem uma natureza contínua, $n/2$ tem natureza discreta, como fica evidente no modelo físico da envoltória (3.4).

É esperado que, se estes parâmetros são obtidos por medidas de campo, suas razões, como definido em (3.5), não devem resultar em um valor inteiro de $n/2$. Há várias razões para isto. Uma delas é que, embora o modelo aqui proposto seja generalizado, ele não deixa de ser uma solução aproximada para o conhecido problema da fase aleatória, como também o são todas os outros modelos de desvanecimento mais conhecidos. Esta limitação do modelo pode ser menos restritiva definindo-se μ como:

$$\mu = \frac{E^2(r^2)}{\text{Var}(r^2)} \times \frac{1+\eta^2}{(1+\eta)^2}, \quad (3.6)$$

sendo μ a extensão real de $n/2$. Valores de μ diferentes de múltiplos de $1/2$ correspondem a valores não inteiros de *clusters*, o que, na prática, pode servir para contemplar fenômenos como a) correlação não-nula entre os *clusters* de componentes de múltiplo percurso; b) correlação não-nula entre as componentes em fase e quadratura em cada *cluster*; c) não-Gaussianidade das componentes em fase e quadratura do sinal de desvanecimento; entre outros. Valores não inteiros de *clusters* já foram verificados experimentalmente, como em [37].

3.2.2 Relação com outras distribuições

A distribuição η - μ é uma distribuição generalizada de desvanecimento que engloba as distribuições Hoyt (Nakagami-q), Gaussiana unilateral, Rayleigh e Nakagami-m como casos especiais seus. A figura seguinte representa as relações entre elas.

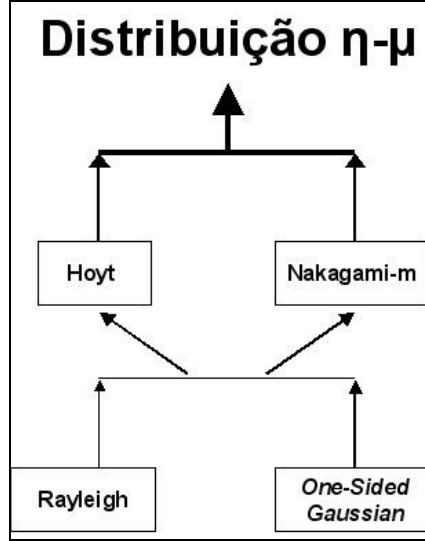


Figura 3.8 – Distribuições de desvanecimento englobadas pela η - μ .

Hoyt, Gaussiana Unilateral e Rayleigh

A distribuição Hoyt (ou Nakagami- q) pode ser obtida de maneira exata a partir da distribuição η - μ escolhendo-se $\mu = 0.5$. Neste caso, o parâmetro Hoyt é dado por $b = -\frac{1-\eta}{1+\eta}$.

De Hoyt, a Gaussiana unilateral é obtida para $\eta \rightarrow 0$. Do mesmo modo, a distribuição Rayleigh é obtida de maneira exata para $\eta = 1$.

Nakagami, Rayleigh e Gaussiana

A distribuição Nakagami pode ser obtida a partir da distribuição η - μ para $\mu = m$ e $\eta \rightarrow 0$. Da mesma forma, isso pode ser feito escolhendo-se $\mu = m/2$ e $\eta \rightarrow 1$. A partir de Nakagami- m , obtém-se a distribuição Rayleigh para $m = 1$ e a Gaussiana unilateral para $m = 0.5$.

O resumo do que foi descrito nestas duas últimas subseções pode ser visualizado na tabela seguinte.

Tabela 3.2 – Obtenção de outras distribuições de desvanecimento a partir da η - μ .

η	μ	Distribuição η - μ
$\rightarrow 0$	0.5	Gaussiana Unilateral
$\rightarrow 0$	1	Rayleigh
$\rightarrow 1$	0.5	
$\rightarrow 0$	m	Nakagami- m
$\rightarrow 1$	$m/2$	
$\frac{1+b}{1-b}$	0.5	Hoyt

3.2.3 Aplicação da distribuição η - μ

Da mesma forma da κ - μ , a distribuição η - μ é caracterizada por dois parâmetros, η e μ , para os quais já existem estimadores, que, entretanto, não serão utilizados neste trabalho, por não terem sido ainda validados. De (3.6) e da usual definição de m como o inverso da variância normalizada da potência do sinal de desvanecimento, temos que

$$m = \frac{\mu(1+\eta)^2}{1+\eta^2}. \quad (3.7)$$

Para um dado m , um dos parâmetros η ou μ é escolhido de forma a propiciar o melhor ajuste e o outro, calculado por (3.7). Também não há obrigatoriedade sobre qual dos dois parâmetros deve ser escolhido. Pode ser qualquer um, desde que μ esteja no intervalo $m/2 \leq \mu \leq m$, que são os valores que ele pode assumir dentre os limites de η : $0 \leq \eta \leq 1$. Neste trabalho, será escolhido o valor de η . A forma desta escolha é a verificação gráfica, que será explicada na seção 5.1.7. Dado este η escolhido, μ é calculado de (3.7) como:

$$\mu = \frac{m(1+\eta^2)}{(1+\eta)^2}. \quad (3.8)$$

3.3 A DISTRIBUIÇÃO κ - μ e A DISTRIBUIÇÃO η - μ

No plano $P(\rho) \times \rho$, onde $P(\rho)$ é a função de distribuição acumulada da envoltória normalizada, as curvas da distribuição κ - μ localizam-se todas acima da curva Nakagami, como exemplificado na Figura 3.3. Por outro lado, as curvas da distribuição η - μ ficam todas abaixo da curva Nakagami, como pode ser visto na Figura 3.7. De forma geral, a distribuição Nakagami pode ser vista como uma distribuição média, que divide o plano de desvanecimento em dois: o plano superior, descrito pela distribuição κ - μ , e o plano inferior, descrito pela η - μ , conforme ilustrado na figura 3.9.

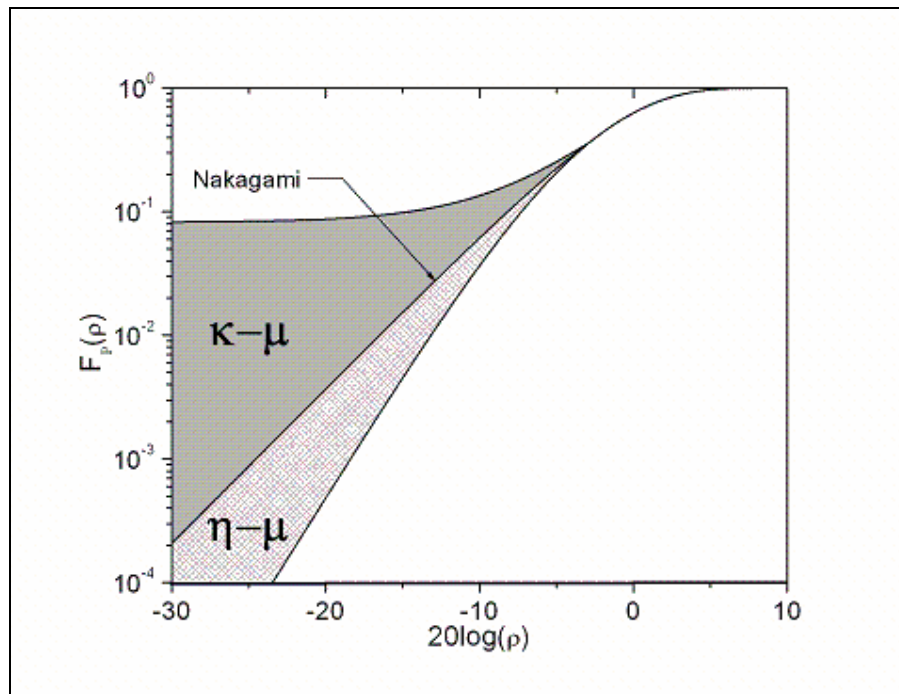


Figura 3.9 – Funções de distribuição cumulativas κ - μ e η - μ com relação à Nakagami ($m = 1.25$)

Esta característica pode ser usada a fim de se escolher a melhor distribuição para ajustar os dados experimentais. Para um certo arquivo de dados, calcula-se o parâmetro m de Nakagami e desenha-se sua curva no plano de desvanecimento junto com os pontos experimentais. Se os pontos estiverem acima da curva Nakagami, então a melhor distribuição para ajustar estes dados é a κ - μ . Caso contrário, a melhor é a distribuição η - μ . Deve-se observar que a versatilidade proporcionada pelo uso de dois parâmetros torna estas duas distribuições apropriadas para ambientes nos quais as distribuições tradicionais não

conseguem ajustar bem os dados experimentais, particularmente para baixos valores da envoltória de desvanecimento.

Podemos também fazer um resumo das considerações dos modelos físicos das diversas distribuições de desvanecimentos aqui analisadas, conforme demonstrado na figura 3.10.

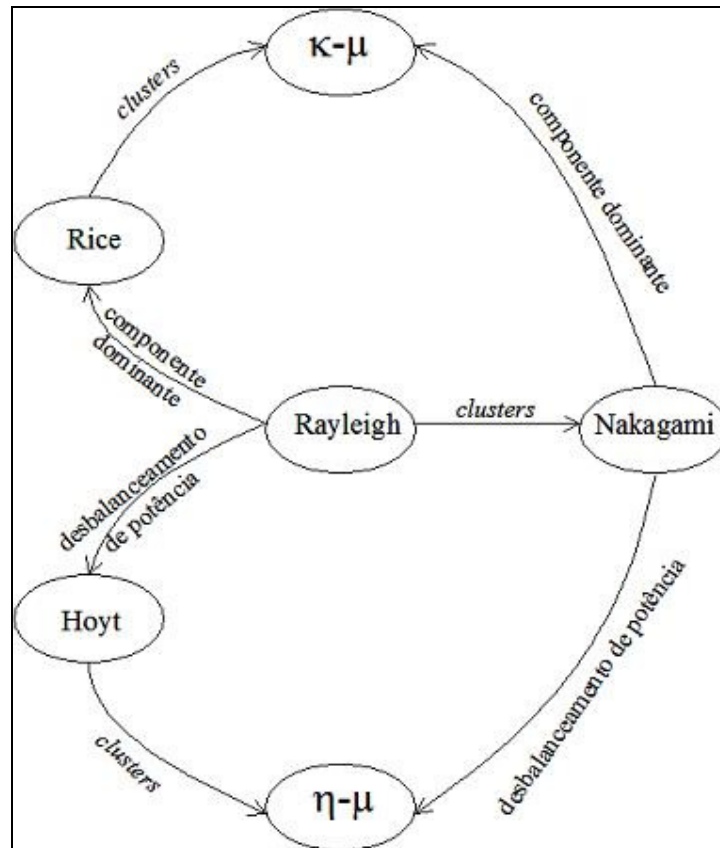


Figura 3.10 – Modelos físicos das distribuições de desvanecimento.

Na figura 3.10, o ponto de partida é a distribuição Rayleigh, a primitiva das demais. A partir dela e fazendo generalizações chegamos às outras distribuições. Por exemplo, generalizando o modelo Rayleigh pela consideração do desbalanceamento de potência entre as componentes em fase e quadratura do sinal de desvanecimento chegamos ao modelo Hoyt. De Hoyt, considerando que o sinal é composto por *clusters* de múltiplo percurso, chegamos à distribuição η - μ .

3.4 CONCLUSÕES

Neste capítulo foram descritas as distribuições κ - μ e η - μ , distribuições generalizadas de desvanecimento, que podem ser utilizadas para descrever a variação de pequena escala de um sinal desvanecido.

Foi explicado que a distribuição κ - μ inclui as distribuições Rice e Nakagami como casos especiais, enquanto que a η - μ inclui as distribuições Hoyt e Nakagami. Desta forma, as distribuições Gaussiana unilateral e Rayleigh também são casos especiais de ambas.

Mais do que isso, as distribuições μ possuem dois parâmetros, que lhes proporcionam um maior grau de liberdade e, por consequência, uma maior flexibilidade nas curvas. Isto as torna apropriadas para alguns ambientes nos quais as distribuições tradicionais não conseguem ajustar bem os dados experimentais, particularmente para baixos valores da envoltória de desvanecimento.

CAPÍTULO 4

MEDIÇÕES

A etapa primordial deste estudo foi a construção de um equipamento de medições, que foi intitulado, em [10], de Equipamento de Aquisição de Dados Modular Espacialmente Controlado (EADMEC). A necessidade de construção de um equipamento específico para este trabalho, em oposição à simples utilização de um equipamento de *drive-test* como os que são usados nos projetos de redes de telefonia celular, surgiu de uma das premissas desta pesquisa: a separação dos desvanecimentos lento e rápido. Para fazer essa separação é necessário saber, com boa precisão, o número de medidas coletadas por comprimento de onda percorrido, o que será mais bem explicado no item 4.2.4. Sendo assim, o equipamento deveria ser controlado espacialmente, i.e., cada amostra seria coletada depois de percorrida uma distância pré-definida. Os equipamentos de *drive-test* coletam medidas por intervalo de tempo. Para que eles pudessem ser utilizados, seria necessário ter controle da sua velocidade de movimentação. Se em ambientes abertos este controle pode não ser perfeito e ocasionar imprecisões no resultado obtido, em ambientes fechados, que são o objeto de estudo, isso seria inviável.

As etapas de projeto, construção e testes do EADMEC consumiram grande parte do tempo deste trabalho, chegando a ter uma duração semelhante à da realização das medições propriamente ditas. Além da característica básica de ser controlado espacialmente, este equipamento precisou ser projetado para atender requisitos como poder ser conduzido a uma velocidade adequada sem que sejam perdidas amostras, minimizar o tempo de realização das medições e possibilitar o monitoramento em tempo real do andamento da coleta, evitando que erros só sejam descobertos após a análise dos dados. Além disso tudo, também foi preciso considerar os custos envolvidos na aquisição de equipamentos. Os detalhes do projeto são o assunto da primeira seção deste capítulo.

Outra atividade importante foi a definição dos procedimentos de medições: quantos e quais seriam os prédios avaliados, como deveriam ser e onde deveriam estar

localizadas as fontes geradoras do sinal a ser medido, quantas amostras deveriam ser coletadas para cada ambiente, dentre outras coisas. Estes assuntos serão tratados na segunda seção deste capítulo.

4.1 EQUIPAMENTO DE MEDIÇÕES

O equipamento pode ser dividido em quatro partes independentes, conforme apresentado no diagrama de blocos da Figura 4.1: amostrador espacial, medidor do sinal, adquiridor de dados e fornecedor de energia.

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

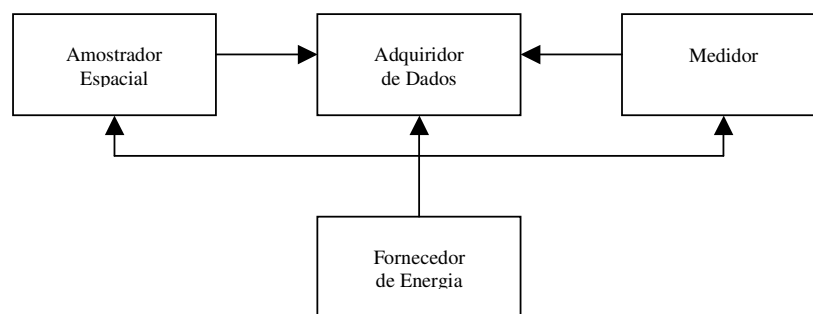


Figura 4.1 – Diagrama de blocos do EADMEC.

Em função de sua construção modular, o equipamento possibilita outras configurações através da substituição adequada dos módulos.

4.1.1 Amostrador espacial

Essa parte provê 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. Ele consiste de uma chapa de alumínio dentada acoplada a uma quinta roda, conforme mostrado na figura seguinte:



Figura 4.2 – Roda dentada do EADMEC.

Para cada dente que passa pelo circuito amostrador, uma amostra é coletada. O número de dentes da roda (n) deve ser definido de 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 através da seguinte equação:

$$n = \frac{\pi D}{d_d} \quad (4.1)$$

onde D é o diâmetro da roda.

Para que o sinal seja corretamente reproduzido, a máxima distância entre amostras é igual a um quarto do comprimento de onda (λ) do sinal medido [38]. Substituindo o número de dentes por esse valor (i.e., $d_d = \lambda/4$) na equação (4.1), obtém-se a quantidade mínima teórica de dentes ($n_{\min_t}$) na roda:

$$n_{\min_t} = \frac{4\pi D}{\lambda} \quad (4.2)$$

ou, em termos da frequência da portadora (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:

$$n_{\min_t} = \frac{\pi D f_p}{0,75 \times 10^8} \quad (4.3)$$

Considerando que desvanecimentos de 40 dB abaixo do nível médio do sinal são comuns, com sucessivos mínimos ocorrendo a cada meio comprimento de onda [39], i.e., a cada $\lambda/2$, e que intervalos de amostragem menores que um décimo do comprimento de onda asseguram estatísticas realistas deduzidas a partir dos dados [40], o número mínimo de amostras, $n_{\min}$, que deverá ser coletado pode ser reescrito (e.g., $\frac{\lambda/4}{\lambda/10} = 2,5$):

$$n_{\min} = 2,5 \times \frac{\pi D f_p}{0,75 \times 10^8} \quad (4.4)$$

Por outro lado, a limitação de velocidade da placa de aquisição implica em um limitante do número máximo de dentes que a roda pode ter. 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 esse limite superior, pode-se escrever n , agora $n_{\max}$, em termos da velocidade de movimentação do equipamento (v). Para isto, basta considerar que o tempo de uma volta da roda (t) é dado por:

$$t = \frac{n_{\max}}{f_{aq}} \quad (4.5)$$

Esse tempo pode, também, ser escrito como:

$$t = \frac{\pi D}{v_{\max}} \quad (4.6)$$

onde $v_{\max}$ é a velocidade máxima com que se deseja mover o EADMEC durante as medições.

Substituindo a equação (4.5) na equação (4.6) tem-se:

$$n_{\max} = \frac{\pi D f_{aq}}{v_{\max}} \quad (4.7)$$

Portanto, utilizando-se os dois limitantes calculados, equações (4.4) e (4.7), tem-se:

$$2,5 \times \frac{\pi D f_p}{0,75 \times 10^8} \leq n \leq \frac{\pi D f_{aq}}{v_{\max}} \quad (4.8)$$

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

$$v_{\max P} = \frac{\pi D f_{aq}}{n} \quad (4.9)$$

No caso da placa de aquisição de dados utilizada nesta versão do EADMEC (Apêndice A), utilizando-se uma abordagem de processamento adequada, foi obtida uma frequência de aquisição, f_{aq} , igual a 300Hz. A seção 4.1.3 esclarece melhor o procedimento.

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

$$D = 22cm, f_p = 1,8GHz, f_{aq} = 300Hz, v_{\max} = 2m/s \approx 7km/h. \quad (4.10)$$

Aplicando-os à equação (4.8), obtém-se:

$$41 < n < 104 \quad (4.11)$$

Selecionou-se para este projeto uma roda com $n=57$ dentes. Desta forma, é assegurada uma boa amostragem do sinal, com **13,745 medidas** adquiridas a cada comprimento de onda. Além disso, há uma folga razoável com relação à velocidade, o que possibilita uma flexibilidade maior para uso do EADMEC em outras aplicações de interesse. Aplicando a equação (4.9), obtém-se:

$$v_{\max P} = 3,6m/s \approx 13km/h \quad (4.12)$$

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 EADMEC, com velocidades superiores a 4m/s (i.e., 14,4 km/h), deve-se selecionar 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 um interruptor óptico. Esse interruptor, que consiste em um LED acoplado a um fototransistor através de uma fenda 3 mm, 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. Este circuito, de fácil implementação e baixo custo, é alimentado por uma tensão de 12 VDC.

4.1.2 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 de potência do sinal de RF na faixa de UHF. O receptor foi substituído por um analisador de espectro, 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 EADMEC. O sinal de RF recebido pela antena é encaminhado ao atenuador variável.

Amplificador/ Atenuador variável

A função do conjunto amplificador/atenuador variável é proporcionar uma faixa de operação linear adequada para o medidor do sinal e manter o nível do sinal recebido dentro desta faixa. O primeiro passo foi incluir um amplificador de baixo ruído (i.e., LNA) de 40dB no sistema. Com este amplificador e todo o sistema montado, foi levantada a curva de resposta do EADMEC. Para isto, foi aplicado um sinal conhecido, produzido por um gerador

de sinais, e foi medida a saída de vídeo do analisador de espectro, que é a resposta final do sistema. A figura seguinte apresenta a curva obtida.

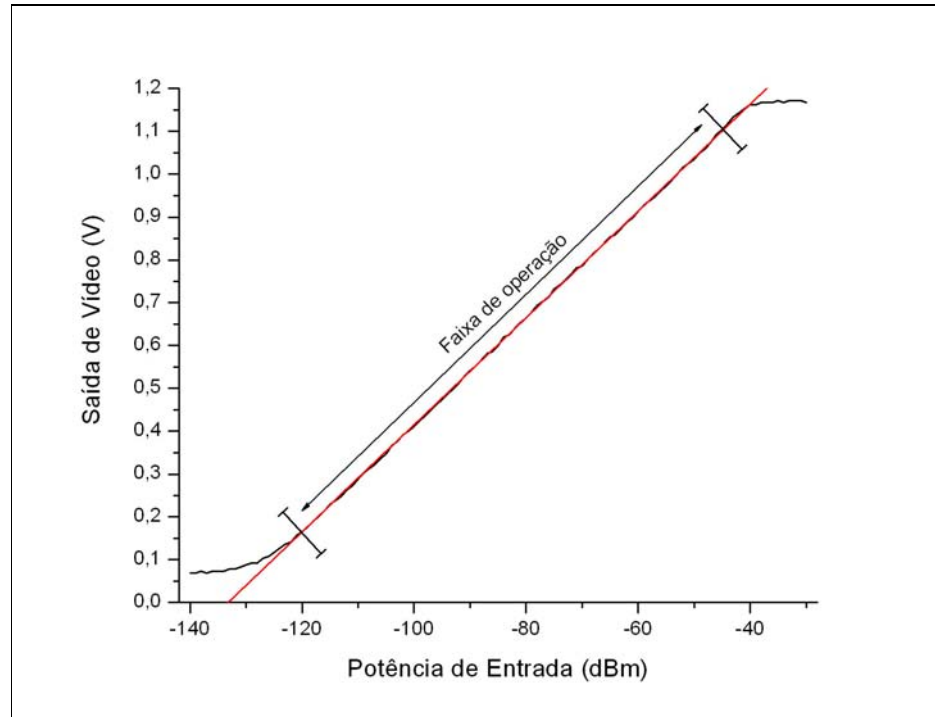


Figura 4.3 – Curva de resposta do EADMEC.

Como pode ser observado na figura 4.3, o sistema apresenta uma resposta linear entre -122 dBm e -45 dBm. Esta foi a faixa inicialmente definida como adequada para a realização das medições. Entretanto, com a inserção da antena receptora, foi observado que o nível de ruído chegava a -120 dBm. Sendo assim, este valor passou a ser adotado como limitante inferior e a faixa de operação final obtida ficou entre -120 dBm e -45 dBm.

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

$$P = 80,3296730V - 134,4735997 \quad (4.13)$$

onde P é a potência em dBm e V , a tensão em volts. Esta reta, juntamente com os limitantes citados, também estão presentes na Figura 4.3.

No caso das medições feitas nas proximidades da antena transmissora, há necessidade de se aplicar uma certa atenuação para que o sinal recebido não ultrapasse o

limite superior de -47 dBm. Por isso, foi inserido um atenuador variável. O atenuador escolhido varia entre 0 e 110 dB, em passos de 10dB. Embora possua o limite de 110dB, a atenuação máxima utilizada foi de 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.

Analísador de espectro

As únicas exigências de especificação para esse equipamento de medida é 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 EADMEC.

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 pode “analisar” um espectro de 0 Hz, ou seja, operar como um 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 $15\mu\text{s}$.
- O *VBW* e o *BW* são parâmetros que definem o formato de filtros internos do analisador. Quanto menor forem os valores selecionados, menor será a largura de banda desses filtros e, portanto, menos ruído será captado pelo equipamento; por outro lado, cresce a sensibilidade com relação a mudanças de temperatura, uma vez que a variação de temperatura pode afetar a frequência central dos filtros em questão. Isto é, a seleção dos valores está diretamente correlacionada à faixa de valores de potência que o EADMEC 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 EADMEC foram 10kHz e 30Hz 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. Esta atividade foi feita em conjunto com o levantamento da curva de resposta do equipamento, descrita na subseção anterior.

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

4.1.3 Adquiridor de dados

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

Placa de aquisição

A especificação mais importante para a placa é 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 EADMEC, conforme considerações feitas na seção 4.1.1. Como há necessidade de adquirir somente dois sinais (e.g., a saída de vídeo do analisador e o sinal do circuito amostrador), a placa deve operar apenas com duas entradas analógicas. Isso simplifica o software de tratamento dos dados e possibilita a utilização de uma placa de baixo custo.

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

Computador/Software

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

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

A figura 4.4 ilustra a interface com o usuário do software. 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 EADMEC, 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.

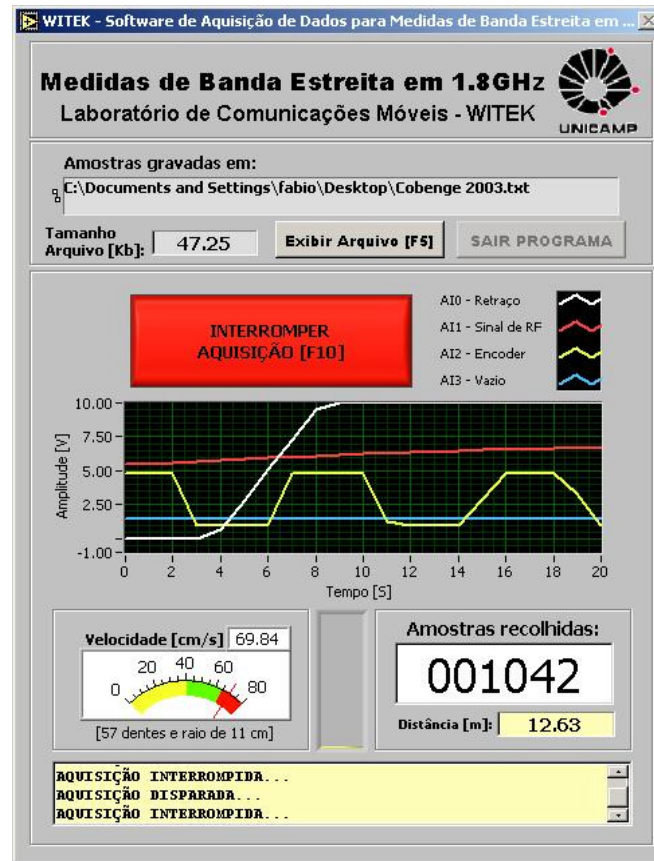


Figura 4.4 – Interface do software com o usuário.

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 software, estes foram chamados de *Encoder* e Sinal de RF, respectivamente. Dessa forma, a tarefa do software é, essencialmente, a de 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 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 hardware 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 são feitas simultaneamente e na maior taxa possível. Com isso, a identificação dos instantes nos

quais acontecem as transições e, portanto, os instantes de valores válidos para o Sinal de RF, passou a ser realizada exclusivamente por software. Essa estratégia possibilitou a amostragem dos quatro canais analógicos a 300 vezes por segundo, o que permite que o sistema EADMEC possa ser utilizado com folga na faixa de velocidade de uma pessoa caminhando, como determinado na equação 4.12. No modo de operação utilizado pela placa de aquisição de dados, os valores amostrados são enviados ao microcomputador de controle em rajadas, cada uma delas contendo uma série de amostras. Essas amostras são então processadas, e na medida em que transições no Encoder são identificadas, o valor do Sinal de RF é registrado.

4.1.4 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. Este 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 (Anexo I) resultou em uma autonomia de seis horas e quarenta minutos.

A junção de todos os componentes descritos anteriormente pode ser visualizada nas próximas figuras, que apresentam fotos do EADMEC em diversas perspectivas.



Figura 4.5 – Visão frontal do EADMEC.

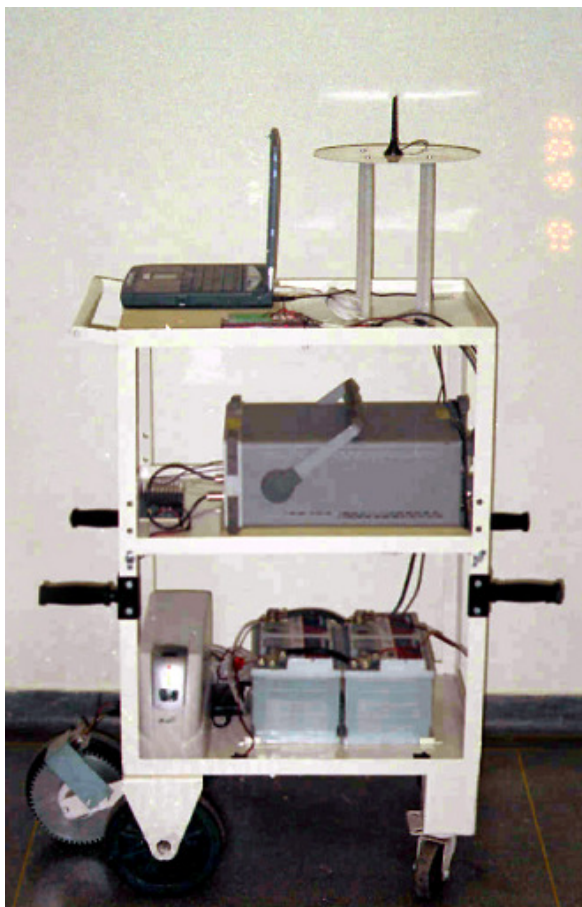


Figura 4.6 – Visão lateral do EADMEC.



Figura 4.7 – Visão traseira do EADMEC.

4.2 PROCEDIMENTOS DE MEDIÇÕES

A primeira definição dos procedimentos foi a de que as medições seriam realizadas em ambientes internos, por serem estes os que mais necessitam de novas investigações. A seguir foram definidos os locais onde deveriam estar localizadas as fontes transmissoras. Conforme descrito na seção 4.2.1, foram realizados dois tipos de medições, um com o transmissor fixo em um prédio externo aos locais de medidas – que chamamos de medições *Into buildings* – e outro com o transmissor dentro de cada um dos prédios analisados, intituladas de medições *Within buildings*. A partir daí, foi preciso escolher quantos e quais prédios seriam estudados, o que foi feito objetivando-se diversificar as características que mais influenciam a propagação do sinal. Por fim, foi definida a forma de obtenção dos dados – a quantidade de amostras por ambiente e outro detalhes – e a forma de filtragem dos dados, com destaque para a definição do tamanho da janela móvel que fosse adequada para proporcionar uma correta separação dos fenômenos de propagação.

4.2.1 Tipos de medições quanto à localização do transmissor

Into buildings

Este tipo se caracteriza por utilizar um transmissor fixo e externo aos prédios. O termo *Into buildings* pode ser traduzido como “para dentro” das edificações, em referência ao percurso que o sinal faz do transmissor até o receptor.

Neste caso, o transmissor e sistema irradiante foram instalados no topo do bloco E da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação (FEEC) da Unicamp. A figura seguinte apresenta uma foto do local.



Figura 4.8 – Localização do transmissor nas medições *Into buildings*.

O sistema transmissor consistiu nos seguintes equipamentos:

- ◆ Gerador de sinais, configurado na frequência de 1.8 GHz e potência de + 3.2 dBm;
- ◆ Amplificador com ganho de 40 dB em 1.8GHz;
- ◆ Cabo CELLFLEX 1/4", com 22m de comprimento;
- ◆ Antena monopolo vertical, com 1,6m de altura e ganho de 11 dBi.

Com estes equipamentos e configurações, a potência isotrópica efetivamente irradiada (EIRP, i.e Effective Isotropic Radiated Power) resultante foi igual a 40 W. O valor do sinal em cada ponto do sistema de transmissão é mostrado na figura 4.9.

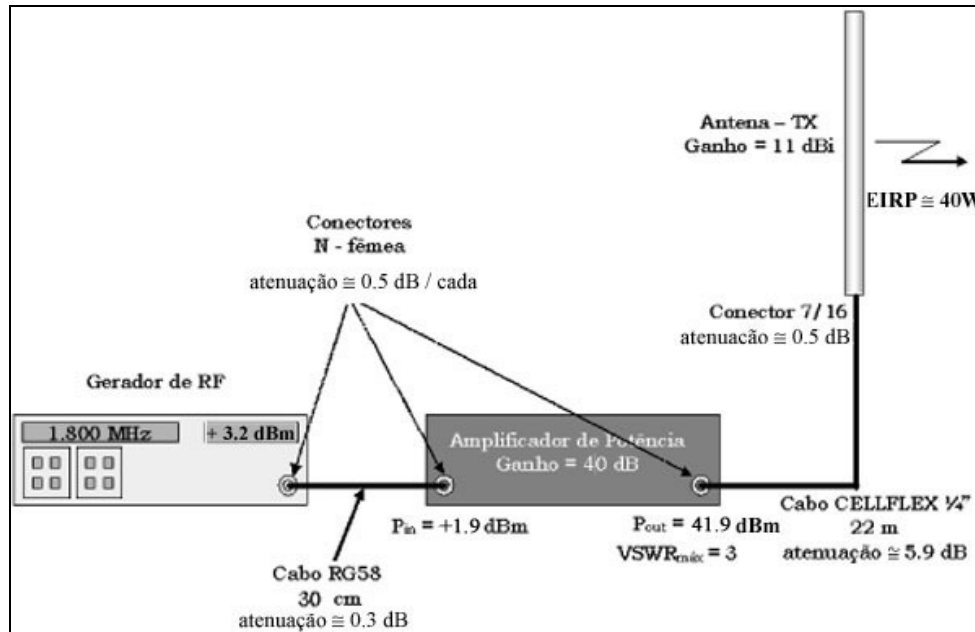


Figura 4.9 – Diagrama do sistema de transmissão nas medições *Into buildings*.

Within buildings

Este tipo se caracteriza por utilizar um transmissor interno ao prédio onde as medições estão sendo realizadas. O termo *Within buildings* pode ser traduzido como “contido” nas edificações.

Na definição da localização do transmissor em cada um dos prédios estudados, o objetivo foi utilizar uma sala ampla, próxima ao centro geométrico do prédio. Alguns limitantes práticos, como a segurança e disponibilidade de local, impediram o atendimento pleno deste objetivo, mas sempre foi utilizada a opção mais próxima. Nos casos de prédios com número de andares par, quando o centro vertical se localizava no meio de dois andares, foi escolhido o piso superior para instalação do transmissor. O motivo desta escolha foi a obtenção de um maior nível de sinal médio, como concluído em [20].

O sistema transmissor foi composto dos seguintes equipamentos:

- ◆ Gerador de sinais em 1.8 GHz;
- ◆ Amplificador com ganho de 40 dB em 1.8GHz;
- ◆ Antena monopolo vertical, com ganho de 2 dBd.

A potência de saída do gerador e a necessidade de utilização do amplificador foram definidas dependentemente das características do prédio. Sendo assim, a EIRP variava

de acordo com o edifício e, algumas vezes, com a sala avaliada, de forma que o nível de sinal estivesse contido nos limites de medição do EADMEC, como definido na seção 4.1.

4.2.2 Descrição dos prédios escolhidos

A escolha dos prédios que seriam estudados foi feita de forma que houvesse diversidade dos principais fatores que influenciam na propagação do sinal rádio-móvel. São eles: distância da fonte transmissora (no caso das medições *Into buildings*), quantidade de andares e número de salas por andar. Além destes, outros fatores como o tipo de construção e a facilidade de acesso também foram considerados. O limitante das possibilidades de escolha foi a existência de nível de sinal suficiente para a realização das medições *Into buildings*. Por isto, todas as edificações estudadas estão contidas no campus da Unicamp.

Com o intuito de permitir maiores comparações, inclusive em trabalhos futuros, os ambientes analisados foram os mesmos para os dois tipos de medições, *Into e Within buildings*. A tabela 4.1 descreve os prédios escolhidos e suas características.

Tabela 4.1 – Descrição dos edifícios onde foram realizadas as medições.

Nome do prédio	Distância (m)	Quantidade de andares	Número médio de salas por andar
FEEC – Bloco F	35	2	3
FEEC – Oficina	45	1	1
FEEC – Bloco G2	70	2	3
FEEC – Pós-graduação	95	3	5
FEEC – Demic	210	1	7
FEQ – Bloco C	150	3	4
FEQ – Bloco D	125	3	4
FEM – Bloco A	180	3	5
Ciclo Básico II	715	3	9
FEC – Salas de aula	685	4	5
Ginásio de esportes	940	1	1

As siglas utilizadas na Tabela 4.1 se referem aos institutos da Unicamp e tem os seguintes significados:

- ♦ **FEEC**: Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação
- ♦ **FEQ**: Faculdade de Engenharia Química
- ♦ **FEM**: Faculdade de Engenharia Mecânica
- ♦ **FEC**: Faculdade de Engenharia Civil

As próximas figuras apresentam as fotos dos prédios escolhidos.



Figura 4.10 – FEEC/Bloco F.



Figura 4.11 – FEEC/Oficina.



Figura 4.12 – FEEC/Bloco G2.



Figura 4.13 – FEEC/Pós Graduação.



Figura 4.14 – FEEC/Demic.



Figura 4.15 – FEQ/Bloco C.



Figura 4.16 – FEQ/Bloco D.



Figura 4.17 – FEM/Blóco A.



Figura 4.18 – Ciclo Básico II.



Figura 4.19 – Ginásio de esportes (vista externa).



Figura 4.20 – Ginásio de esportes (vista interna).



Figura 4.21 – FEC/Salas de aula.

4.2.3 Obtenção dos dados

Foi determinado que cada arquivo deveria conter pelo menos 10.000 amostras a fim de garantir significância estatística dos resultados, como observado, por exemplo, em [47]. Em cada ambiente, era definido um trajeto a ser percorrido, de forma a abranger a maior parte possível da área do local. Este trajeto era repetido até que fossem completadas as 10.000 amostras. Depois disso, a medição continuava até que se retornasse ao local inicial, para que fosse percorrido um número inteiro de voltas.

No caso específico do ginásio de esportes para as medições *Into buildings*, foram obtidas 1.000.000 (um milhão) de amostras, divididas em 10 arquivos de 100.000 (cem mil). O intuito dessa diferença foi permitir a análise de melhoras nas conclusões com o uso de espaços amostrais mais significativos. Além disso, os arquivos com mais pontos poderão ser utilizados em trabalhos futuros, como, por exemplo, o teste de estimadores para as distribuições κ - μ e η - μ , os quais, nas suas propostas iniciais, precisavam de uma quantidade grande de pontos (da ordem de 10^6) para resultar em erros aceitáveis.

4.2.4 Filtragem dos dados

Como sabido, o sinal recebido em um ambiente rádio móvel sofre dois tipos principais de desvanecimento: o desvanecimento lento, devido a variações topográficas, e o desvanecimento rápido, devido à propagação de múltiplo percurso. Matematicamente, podemos expressar essa característica da seguinte forma:

$$S(t) = M(t) + R(t) \quad (4.14)$$

onde $S(t)$ é o sinal recebido, $M(t)$ é a média local, que corresponde ao desvanecimento lento, e $R(t)$ é o desvanecimento rápido, todos expressos em decibéis.

Nas medições de campo é obtido $S(t)$. Para determinar as distribuições de $R(t)$, é preciso separá-lo de $M(t)$. Para isto, usa-se o fato de $M(t)$ variar lentamente em comparação com $R(t)$. Desta forma, ao se aplicar uma filtragem passa-baixas em $S(t)$, obtemos $M(t)$. Depois, basta fazer a subtração dos arquivos, $R(t) = S(t) - M(t)$, para extrair $R(t)$.

O processo de filtragem passa-baixas de $S(t)$ pode ser executado fazendo com que para cada amostra sua seja feita a média de $2k + 1$ amostras adjacentes (k amostras acima e abaixo da amostra em questão), entre as quais não haja variação perceptível na média. Isto equivale, matematicamente, à equação

$$\hat{M}_i = \frac{1}{2k+1} \sum_{j=-k}^k S_{i+j} \quad (4.15)$$

na qual S_i é a i ésima amostra recolhida e $\hat{M}_i$ é a i ésima média local estimada.

Essa operação descrita pela equação (4.15), de calcular a média do sinal continuamente, é chamada de média móvel ou janela deslizante. A referência [38] demonstra que a equação (4.15) realmente exerce a função de filtragem passa-baixas.

Com isso, o sinal de desvanecimento rápido estimado ($\hat{R}_i$) é dado por:

$$\hat{R}_i = S_i - \hat{M}_i \quad (4.16)$$

A figura seguinte mostra um exemplo gráfico das medidas adquiridas em um dos ambientes estudados. As duas figuras posteriores a esta, apresentam os resultados após cada uma das etapas de filtragem descritas pelas equações (4.15) e (4.16).

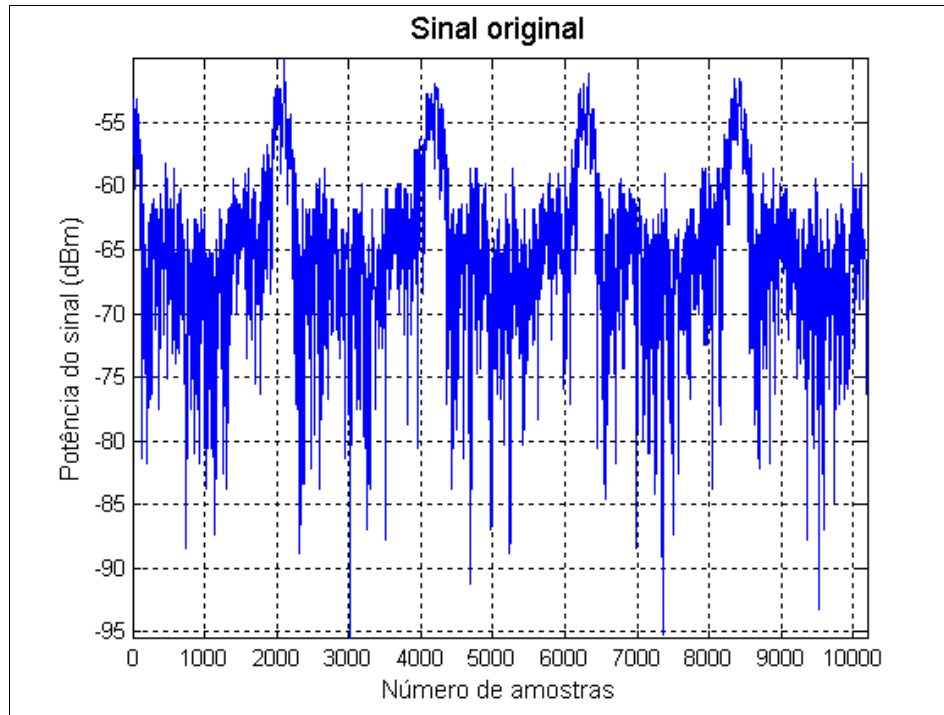


Figura 4.22 – Exemplo de arquivo com medidas.

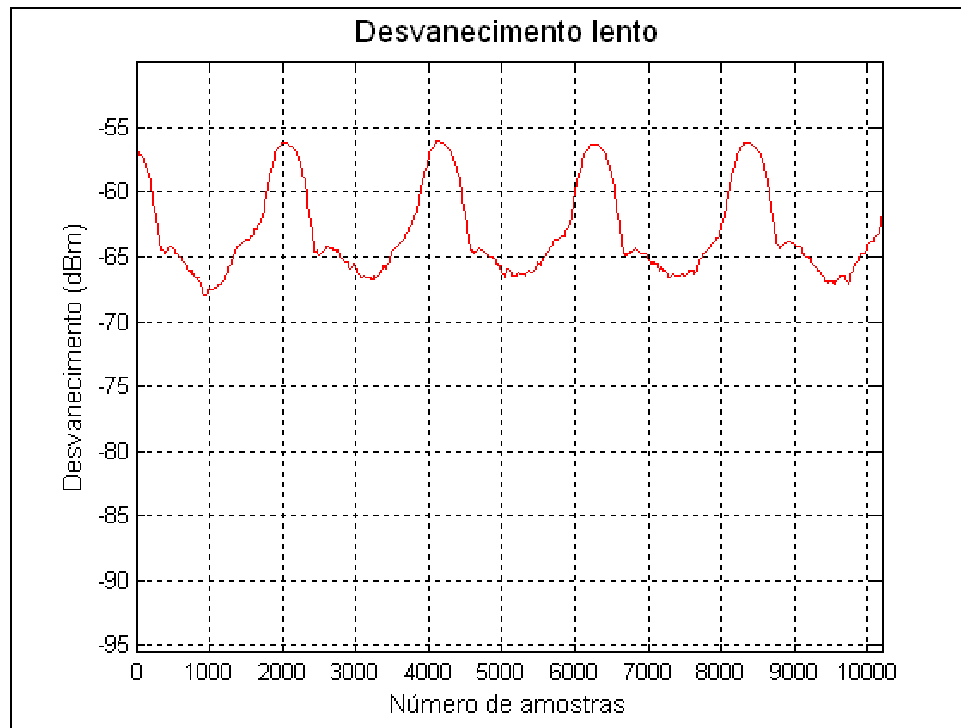


Figura 4.23 – Exemplo de desvanecimento lento do sinal.

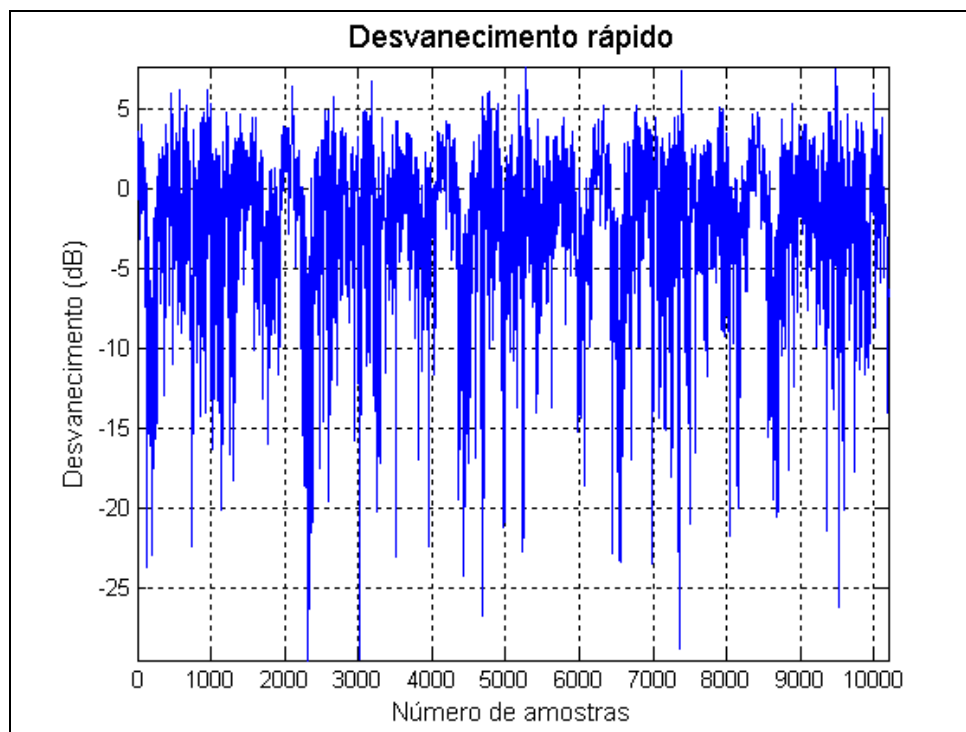


Figura 4.24 – Exemplo de desvanecimento rápido do sinal.

Uma definição muito importante nesse processo de filtragem é o tamanho da janela de $2k + 1$ amostras. Ela não deve ser muito pequena, sob pena de serem introduzidos grandes erros no processo de amostragem. Em [41], é mostrado que tamanhos de janela inferiores a 5λ introduzem erros inaceitáveis, que geram uma superestimativa dos efeitos de sombreamento. Por outro lado, em janelas muito grandes a média do sinal pode não permanecer constante dentro dela, o que ocasionará perda da variação lenta do sinal. Levando em consideração esse dois aspectos, a referência [42] propõe limites dos dois extremos. Nela, conclui-se que é adequado o tamanho de janela entre 20 e 40 comprimentos de onda.

Apesar da existência destes limites, a definição exata de um valor ainda se confronta com outro problema. Como destacado pelos trabalhos aqui citados neste assunto, o tamanho ideal da janela depende das características específicas do ambiente analisado. Por isso, antes de ser feita a escolha a ser utilizada neste trabalho, foram realizados testes de algumas opções de tamanhos para filtrar diversos arquivos obtidos na prática. O objetivo destes testes foi definir, para cada ambiente, qual opção resultava em um gráfico de desvanecimento lento mais próximo do esperado, no qual fossem mais bem filtradas as variações bruscas do sinal e preservadas as variações lentas. As opções testadas foram quatro: 10, 20, 30 e 40 comprimentos de onda. O motivo principal destas escolhas foi o limite definido em [42]. A opção de 10λ também foi incluída por ter sido utilizada em outro trabalho muito importante em medições práticas, a referência [20].

Os testes resultaram na escolha da opção de 30λ , por ter sido a mais adequada para a maior parte dos ambientes. Como esta janela equivale, na prática, a um número de amostras, foi escolhido o valor de 450 amostras, que resultou, mais precisamente, em um tamanho de janela igual a 32,74 comprimentos de onda.

Exemplos dos testes feitos são mostrados na sequência. Serão apresentados dois casos, um exemplificando as medições *Into buildings* e o outro, as *Within buildings*.

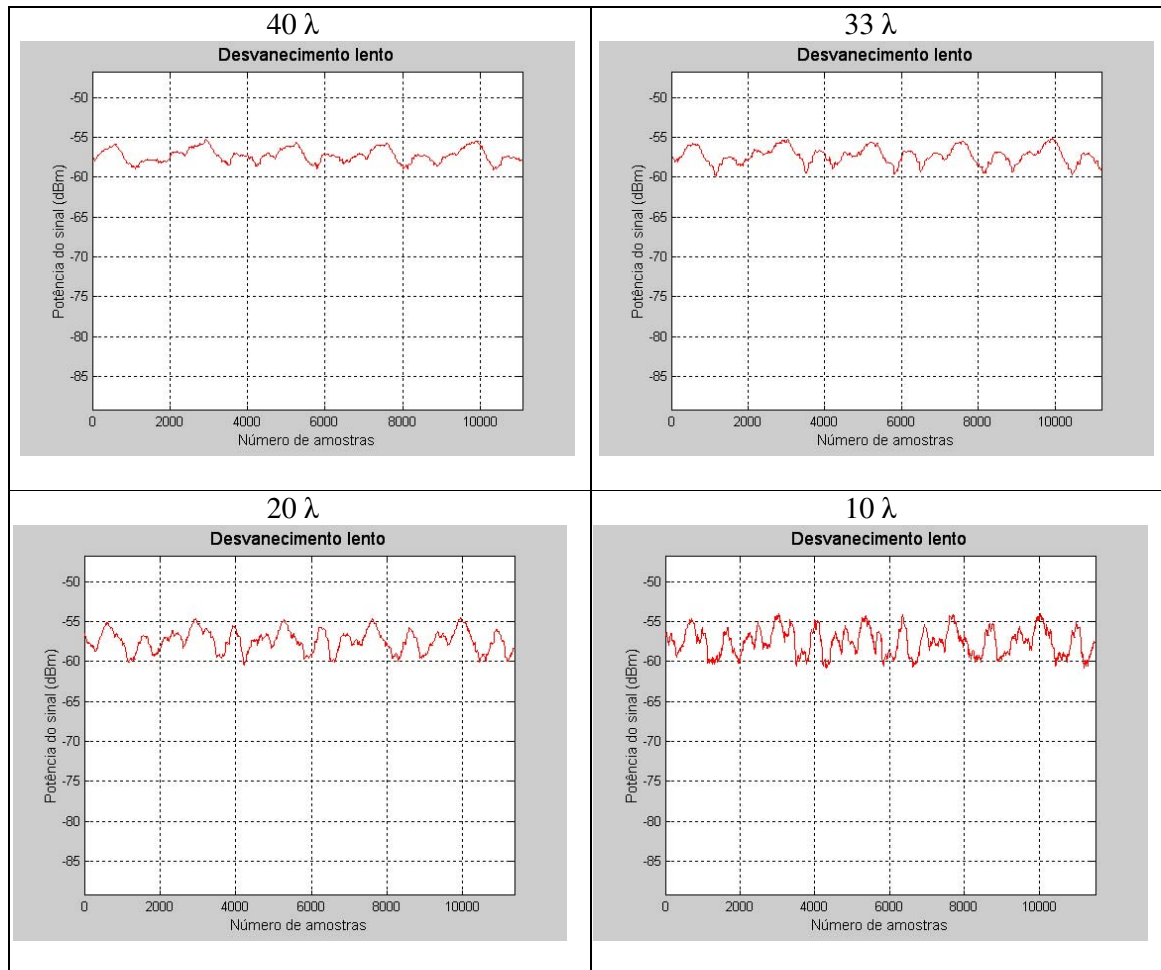


Figura 4.25 – Comparação do tamanho da janela em ambiente de medição *Into buildings*.

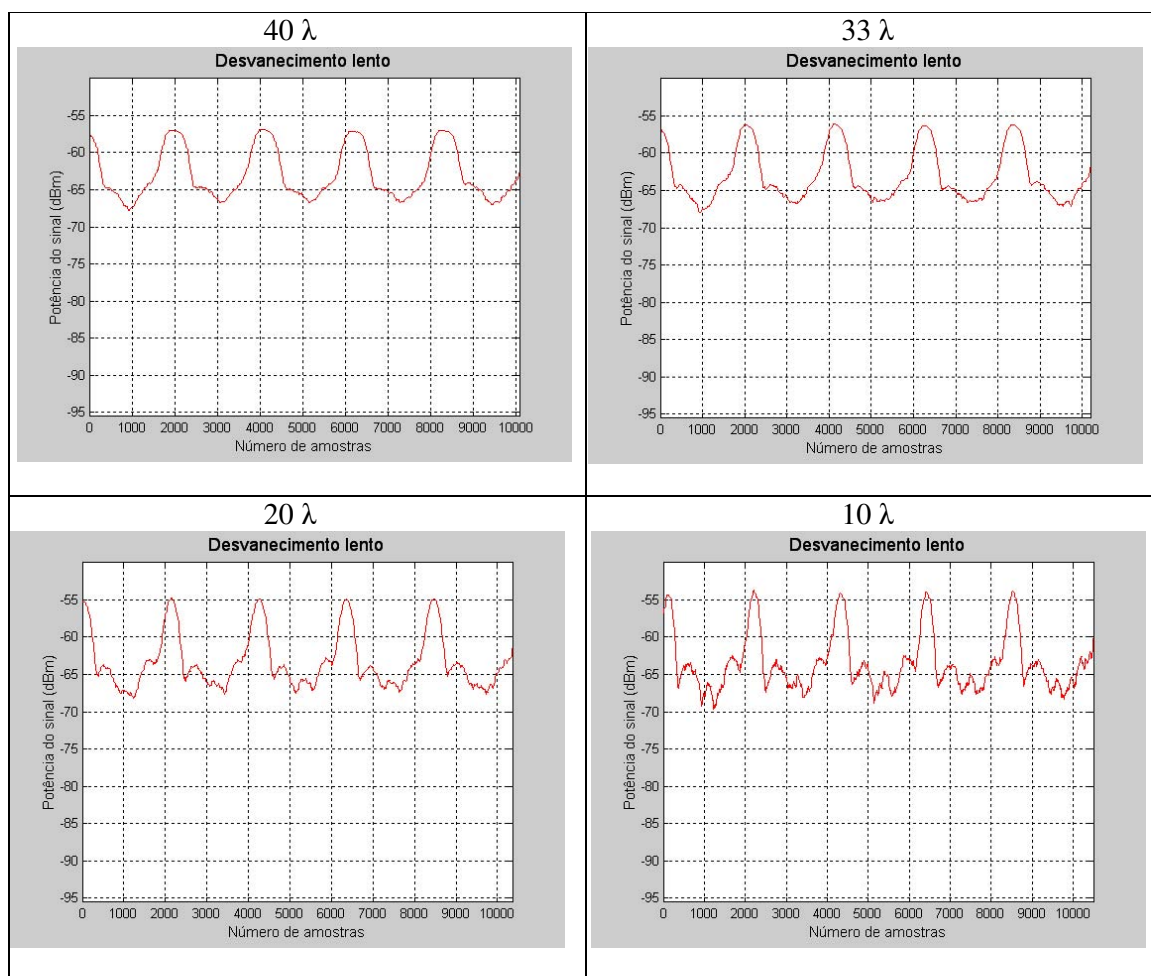


Figura 4.26 – Comparação do tamanho da janela em ambiente de medição *Within buildings*.

Como pode ser observado nas figuras, o valor de 33λ é o mais adequado. Janelas menores resultaram em arquivos que não filtram totalmente o desvanecimento rápido, o que pode ser concluído pela falta de suavidade das curvas. Já com a janela de 40λ , as variações lentas começam a ser perdidas.

4.3 CONCLUSÕES

Neste capítulo foram apresentadas todas as etapas para a obtenção dos arquivos de medidas práticas do nível de sinal de uma portadora CW em 1.8 GHz, desde a construção do equipamento de medições até a forma de filtragem dos dados obtidos.

Para o equipamento, intitulado de EADMEC, foi definida uma amostragem de aproximadamente 14 medidas por comprimento de onda e obtida uma faixa de operação de – 120 dBm a – 45 dBm. Também foram explicados, em detalhes, os motivos para a definição destes valores, assim como as configurações de todos os equipamentos usados.

Na seção de procedimentos, foi explicado que foram realizados dois tipos de medições, uma com o transmissor fixo em um prédio externo aos locais de medidas e outra com o transmissor dentro de cada um dos prédios analisados, as medições *Into buldings* e *Within buldings*, respectivamente. Para cada um destes tipos, foram escolhidos 11 prédios diferentes, que resultaram em um espaço amostral de 292 arquivos. Além disso, definiu-se o número mínimo de 10.000 amostras adquiridas para cada ambiente analisado e foi escolhida uma janela móvel com extensão de 33 comprimentos de onda para a filtragem dos dados.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS

Este capítulo apresenta resultados de comparação, quanto ao ajuste de dados experimentais, das distribuições κ - μ e η - μ com outras distribuições tradicionalmente usadas para descrever a variação de pequena escala de um sinal desvanecido: Rayleigh, Rice, Nakagami, Hoyt e Weibull.

A comparação será feita de forma qualitativa, pela apresentação de gráficos obtidos, e de forma quantitativa, através do cálculo do erro resultante do ajuste de cada uma das distribuições em cada ambiente.

O objetivo principal deste capítulo é determinar em que percentual de ambientes as distribuições κ - μ e η - μ implicam em um erro significativamente menor que o das outras distribuições. Além disso, também será determinado o quanto melhor elas são para cada ambiente.

A determinação do percentual de ambientes com melhora significativa do erro é um enfoque novo. Ele é importante por alguns motivos. O primeiro deles é que já era de se esperar que as novas distribuições dificilmente resultassem em um ajuste pior, já que elas englobam as distribuições antigas, com exceção apenas da Weibull. Também se espera que elas apresentem, pelo menos em alguns casos, um ajuste melhor, já que possuem dois parâmetros de ajuste. Nos próprios artigos que introduziram as distribuições μ [4], [5] e [36], são mostrados exemplos em que isso ocorre. Estes exemplos, apesar de justificarem a apresentação das distribuições μ como uma nova opção de descrição da variação de pequena escala, não justificam, a princípio, a utilização prática de tais distribuições. Se as distribuições κ - μ e η - μ são mais flexíveis, elas, por outro lado, têm expressões matemáticas bem mais complexas. As suas utilizações, portanto, estão condicionadas ao quanto de melhora no ajuste elas propiciam. Mais do que isso, é preciso investigar com que frequência elas realmente são necessárias. Se, por exemplo, na maioria absoluta das vezes os ajustes propiciados pelas

distribuições κ - μ e η - μ corresponderem às condições em que elas se igualam às distribuições antigas, sua aplicação terá uma menor importância. Esses questionamentos foram inclusive externados por alguns pesquisadores durante a apresentação de [6]. Este capítulo, através do enfoque proposto e do grande espaço amostral utilizado – de um tamanho sem precedentes na literatura para a análise de distribuições de desvanecimento rápido – objetiva trazer respostas para estas questões.

Outro objetivo deste capítulo é o de comparar as distribuições tradicionais entre si. Mesmo já vindo sendo utilizadas e analisadas há um longo tempo, não existem muitas estatísticas sobre em que percentual de ambientes cada uma delas é adequada.

5.1 DEFINIÇÕES SOBRE A APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Para o melhor entendimento dos resultados apresentados é necessário descrever primeiramente algumas escolhas e justificá-las.

5.1.1 Espaço amostral e trabalhos anteriores

Como descrito no capítulo 4, foram feitos dois tipos de medições quanto à localização do transmissor, cada um deles em 11 prédios diferentes. Nestas edificações, foram percorridos 26 pavimentos, contendo 145 ambientes para as medições *Into Buildings* e 147 ambientes para as medições *Within Buildings*. Desta forma, o espaço amostral será composto por um total de **292 arquivos**.

Este espaço amostral é de um tamanho sem precedentes na literatura específica sobre o assunto. Costuma-se fazer análises das distribuições de desvanecimento rápido com poucas unidades de arquivos, usualmente não ultrapassando uma dezena de ambientes medidos [11, 13, 19]. Mesmo com um número maior de arquivos gerados, muitas vezes eles não são obtidos de forma que possa ser feita uma análise individualmente de cada arquivo para a validação de modelos de desvanecimento rápido, devido, geralmente, à pequena quantidade de medidas por arquivo. Nestes casos, para se gerar um único gráfico comparativo dos modelos de desvanecimento rápido, há necessidade de se unir vários arquivos obtidos [20,

21, 22]. Por exemplo, em [20] a variação de pequena escala foi estudada apenas em suas estatísticas globais, com somente dois resultados apresentados.

Existem ainda alguns trabalhos que citam a obtenção de vários arquivos contendo poucas medidas e não consideram a necessidade de juntar estes arquivos para que as análises tenham significância estatística. Por exemplo, em [35] são apresentados resultados de 21 arquivos, porém cada um destes arquivos contendo apenas 800 pontos. Mesmo nestes casos em que há vários arquivos com poucas medidas, apesar de citar a obtenção de um grande espaço amostral, quase sempre os trabalhos não apresentam estes resultados. Em [43] é citada a obtenção de 8.012 arquivos – um para cada setor de um ambiente, com apenas 500 medidas cada um – mas só são apresentados 4 resultados destes setores, bem como mais 4 resultados do que são intituladas áreas grandes ($100 \times 100 \text{ m}^2$). Já em [44] cita-se a obtenção de “muitas centenas” de arquivos, que haveriam sido ajustados por distribuições de desvanecimento rápido. Entretanto, também só são apresentadas 2 análises baseadas nestas medições (além de 2 análises baseadas em resultados de simulação). Da mesma forma, em [45], apesar de terem sido obtidos 428 arquivos, é apresentado apenas um gráfico para a análise de modelos de desvanecimento rápido.

Há outros trabalhos que não especificam o espaço amostral obtido, mas também só apresentam poucos resultados. Em [46], [47], [17], [14] e [16] são apresentados 1, 2, 4, 5 e 6 resultados, respectivamente.

O único trabalho de que este autor tem conhecimento que apresenta estatísticas de frequência sobre a adequação dos modelos de desvanecimento rápido para o ajuste de dados experimentais é [48]. Em [48] é definido qual modelo – dentre as cinco distribuições incluídas na análise – é o mais adequado para cada um dos 192 arquivos obtidos. Como este é um espaço amostral grande, é possível determinar em que percentual de ambientes cada um destes modelos resulta no melhor ajuste, resultado que também é apresentado nesta dissertação. Deve-se observar, contudo, que existe uma diferença fundamental entre [48] e esta dissertação. Enquanto este trabalho analisa a variação espacial do sinal de desvanecimento, as estatísticas de frequência apresentadas em [48] se referem apenas à variação temporal deste sinal, para posições espaciais fixas. Além disso, [48] não apresenta os resultados quantitativos obtidos, os valores dos erros resultantes de cada ajuste gerado.

Por todos estes motivos citados, consideramos que neste trabalho foi produzido um vasto espaço amostral, sem precedentes na literatura específica sobre desvanecimento rápido. Ele foi obtido não apenas pela inclusão de muitos ambientes no percurso de medições, mas também porque, como já explicado na seção 4.2.3, foi tomado o cuidado de se percorrer

cada ambiente não apenas uma vez, mas sim quantas vezes fossem necessárias até serem obtidos 10.000 pontos. Com isso, foi possível fazer a análise individualmente dos ambientes onde foram realizadas as medições.

5.1.2 Apresentação dos pontos

Pelo motivo a ser explicado na seção 5.1.3, os valores medidos são representados em termos da probabilidade cumulativa de ocorrência de alguns níveis de desvanecimento (função de distribuição cumulativa). A escolha destes níveis e o cálculo de cada probabilidade foram feitos como explicado a seguir. Primeiramente, foi definida a quantidade de **26 pontos** a serem apresentados nos gráficos. Este foi, para a maioria dos ambientes, o maior número que permitiu a boa visualização de todos os pontos, evitando sobreposições entre eles. Estes pontos foram distribuídos equidistantemente do menor para o maior nível medido, o que resultou em um incremento entre cada valor igual a $\frac{1}{25}$ da distância entre estes extremos. A probabilidade de ocorrência cumulativa de cada nível foi calculada contando-se a quantidade de valores medidos inferiores a ele, dividida pelo número total de pontos. Desta forma, como os arquivos são de 10.000 pontos, o menor nível sempre terá a probabilidade igual a 10^{-4} e em todos os gráficos sempre existirá um ponto neste patamar de probabilidade. Para evitar essa repetição e a consideração de pontos pouco representativos, foi definido que só serão levados em conta pontos com ordenada pelo menos uma ordem de grandeza maior do que a mínima, ou seja, que tenham uma probabilidade maior que 10^{-3} .

5.1.3 Estatística analisada

Devido à grande quantidade amostral analisada, a comparação entre as distribuições será feita por apenas uma das estatísticas de primeira ordem. Entre estas, existiam duas opções de escolha: a função densidade de probabilidade (PDF, do inglês *probability density function*) e a função de distribuição cumulativa (CDF, do inglês *cumulative distribution function*). Foi escolhida a CDF porque ela não tem os problemas de descontinuidade que a PDF pode apresentar no ajuste de dados experimentais, que têm tamanho limitado, como observado, por exemplo, em [17]. Portanto, o foco deste trabalho é

uma análise mais representativa da CDF das distribuições. Comparações de estatísticas de ordem superior deverão ser feitas em trabalhos futuros.

5.1.4 Distribuições

As distribuições escolhidas para servirem de comparação com as distribuições κ - μ e η - μ foram as mais conhecidas e geralmente usadas para descrever a variação de pequena escala de um sinal desvanecido: Rayleigh, Rice, Nakagami, Hoyt e Weibull.

A escolha de duas destas distribuições merece uma explicação. A distribuição Rayleigh, por já estar contida nas outras distribuições escolhidas, pode ter questionada, em uma primeira análise, a necessidade de sua inclusão. Por outro lado, mesmo com a quantidade mínima de 10.000 pontos por arquivo, em alguns casos foi observado que os estimadores das outras distribuições escolhidas não funcionam perfeitamente. Nestes casos, a distribuição Rayleigh, que tem um parâmetro estimador muito simples, o valor *rms*, proporciona um melhor ajuste. Por isso, ela foi incluída nesta análise.

Já a distribuição de Weibull, apesar de ter sido inicialmente utilizada em estudos de confiabilidade e não estar incluída como caso especial da κ - μ nem da η - μ , foi incluída na análise por também já ter apresentado bons resultados na representação das características do sinal de múltiplo percurso. Ela tem sido utilizada ultimamente com frequência, validada por dados experimentais, como em [32, 33, 34].

5.1.5 Comparação quantitativa

A comparação quantitativa está fundamentada em duas métricas: o erro percentual médio e a variação do erro percentual médio. Tais métricas serão definidas a seguir.

Erro percentual médio

O parâmetro definido para comparação quantitativa das distribuições foi o erro percentual médio (ϵ), que é dado pela seguinte expressão:

$$\varepsilon = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|y_i - x_i|}{x_i}, \quad (5.1)$$

onde x_i é o valor medido e y_i é o valor teórico obtido pela distribuição de desvanecimento em questão.

Existiam outras opções para mensurar o desvio das distribuições. A mais importante delas, devido à sua grande utilização na literatura, é o teste do chi-quadrado. Neste teste, o desvio chi-quadrado (X^2) é calculado por:

$$X^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(x_i - y_i)^2}{y_i}. \quad (5.2)$$

A equação 5.2 contempla duas características básicas do cálculo correto de soma de erros. A primeira é evitar que parcelas de erro com sinais diferentes se subtraíam, o que é conseguido com a operação de elevação ao quadrado da diferença do numerador. A segunda é fazer com que cada parcela computada seja proporcional ao desvio percentual em relação ao ponto e não ao desvio absoluto. Isso é obtido pela operação de divisão da diferença pelo valor pontual esperado. Apesar de contemplar essas características, a utilização do teste do chi-quadrado não se mostrou adequada para este trabalho. O erro percentual médio foi preferido em relação a esse teste porque exprime mais fielmente o resultado gráfico obtido. Com o teste do chi-quadrado, algumas vezes observa-se que distribuições mais próximas graficamente resultam em erros maiores do que o calculado para distribuições visivelmente mais distantes. Por isso, foi necessário pensar em outro parâmetro de medição. O erro percentual médio, inicialmente apresentado em [49], resolve este problema pela implementação de algumas modificações, que são explicitadas a seguir, juntamente com suas respectivas justificativas:

- ♦ Substituição do quadrado pelo módulo: Elevar o desvio ao quadrado resulta em uma maior “importância” para os valores de probabilidades mais altas. Com isso, o erro total obtido não é igualmente relativo a cada ponto de comparação. Sua substituição pela aplicação do módulo resolve esse problema, sem deixar de executar a função principal daquela operação: evitar que valores de erros com sinais diferentes se subtraíam.
- ♦ Divisão pelo valor medido e não pelo valor teórico: O erro precisa ser mensurado com relação ao valor medido. Caso contrário, a parcela do erro ocasionada por um valor superior ao medido seria menor que o de um valor inferior e equidistante.

- ♦ Normalização pelo número de pontos: A quantidade de pontos utilizados para desenhar os resultados experimentais é uma escolha do pesquisador. Já o valor do desvio de ajustes teóricos é uma grandeza que precisa exprimir a compatibilidade entre os modelos teóricos e experimentais e, por isso, não deve variar com a forma de apresentação dos resultados. A normalização busca prover independência do desvio calculado com a escolha da forma visualização dos gráficos. Consequentemente, ela implica que o valor de erro obtido seja uma média dos erros de todos os pontos, por isso a grandeza ϵ foi definida como erro percentual médio.

É importante notar que o teste do chi-quadrado é usado para determinar se uma distribuição serve ou não para ajustar um conjunto de dados experimentais, enquanto o objetivo deste trabalho é outro: comparar diferentes distribuições entre si. Por isso, foi necessária a criação de outra grandeza de desvio.

Diminuição do erro percentual médio

Além da criação do erro percentual médio, outro fator importante na análise quantitativa foi a definição do valor de erro a partir do qual o ajuste da distribuição κ - μ ou η - μ será considerado significativamente melhor que o das outras distribuições. Para tanto, é preciso definir uma nova grandeza, a variação do erro percentual médio ($\Delta\epsilon$). Ela será dada pela seguinte expressão:

$$\Delta\epsilon = \frac{\epsilon_c - \epsilon_\mu}{\epsilon_c}, \quad (5.3)$$

onde ϵ_c é o erro relativo médio resultante do melhor ajuste entre as cinco distribuições de tradicionais e ϵ_μ é o erro relativo médio resultante do melhor ajuste pelas distribuições μ . Deve-se observar que $\Delta\epsilon$ foi definida de forma que resulte em um valor positivo quando o ajuste pelas distribuições μ propiciar uma diminuição de ϵ . Desta forma, este parâmetro também será chamado, neste trabalho, de diminuição do erro percentual médio.

A definição do limite de melhora significativa de ϵ foi baseada na análise dos gráficos obtidos. Quando $\Delta\epsilon$ é pequena, pela simples observação dos gráficos não é possível definir que distribuição faz o melhor ajuste. Já no caso de variações maiores, a definição pode ser feita com certeza. Este limite da dúvida pela simples análise visual varia de acordo com o arquivo analisado. A observação de todo o conjunto de gráficos permitiu definir um valor de

$\Delta\epsilon$ a partir do qual não há dúvida para a quase totalidade dos arquivos. Este valor, que será adotado aqui, é $\Delta\epsilon > 20\%$.

Portanto, o objetivo central desta dissertação — a definição do percentual de ambientes em que as distribuições $\kappa\text{-}\mu$ e $\eta\text{-}\mu$ implicam em um erro significativamente menor que o das outras distribuições — será alcançado da seguinte forma: para cada arquivo de medida serão calculados os erros relativos médios dos ajustes de todas as distribuições; serão considerados com erro significativamente menor os ambientes nos quais os valores do erro percentual médio dos ajustes da distribuição $\kappa\text{-}\mu$ ou $\eta\text{-}\mu$ forem pelo menos 20% menor que o menor valor de erro percentual médio obtido entre as distribuições Rayleigh, Rice, Nakagami, Hoyt e Weibull. Ou seja, como já descrito, os ambientes nos quais $\Delta\epsilon > 20\%$.

5.1.6 Comparação qualitativa

A comparação qualitativa das distribuições será feita pela apresentação de alguns dos 292 gráficos obtidos, basicamente um gráfico por prédio analisado. Em geral, o arquivo escolhido será aquele em que a distribuição $\kappa\text{-}\mu$ ou $\eta\text{-}\mu$ resultar em uma maior diminuição do erro percentual. Também serão escolhidos arquivos que tiverem um comportamento mais frequente das curvas e que deva ser apresentado pelo menos uma vez.

A comparação qualitativa é importante porque pode haver pontos fora da curva que impliquem em aumento do erro calculado e que sejam provenientes apenas da limitação do tamanho de cada amostra, o que pode comprometer a comparação quantitativa. Já a visualização dos gráficos permite a análise do comportamento geral dos pontos e ajuda na obtenção de uma conclusão mais fundamentada sobre a adequação ou não do modelo teórico em questão.

Deve-se notar que não serão apresentados os ajustes de todas as distribuições nos gráficos. Se isso fosse feito, haveria em cada um deles, além dos pontos experimentais, seis curvas, muitas vezes bem próximas entre si, o que impediria uma visualização clara. Para evitar isso, serão incluídos apenas o melhor e o pior ajuste entre as distribuições tradicionais, e o ajuste de uma das distribuições μ , a que for aplicável ao ambiente em questão.

5.1.7 Ajuste das distribuições μ

Por ter sido feito de uma maneira diferente das demais distribuições, é necessário explicar de que forma foi gerado o ajuste das distribuições μ . A principal diferença advém da inexistência de estimadores confiáveis tanto para os parâmetros da distribuição κ - μ quanto da η - μ . Com isso, foi necessário que tais parâmetros fossem obtidos pelo método de verificação gráfica. Para cada ambiente foram gerados diversos ajustes até que fosse conseguido o mais adequado, aquele que resultasse na maior proximidade gráfica com os pontos experimentais e, consequentemente, no menor valor de ϵ possível. Deve-se ressaltar, contudo, que nestas tentativas eram variados apenas os valores de κ ou de η . O valor do parâmetro μ foi obtido automaticamente, utilizando-se o valor de κ ou η escolhido e o valor estimado do parâmetro m (inverso da variância normalizada), como já definido no capítulo 3: $\mu = \frac{m(1+2\kappa)}{(1+\kappa)^2}$, para a distribuição κ - μ e $\mu = \frac{m(1+\eta^2)}{(1+\eta)^2}$, para a distribuição η - μ .

5.1.8 Estrutura das tabelas

Os principais resultados deste trabalho serão apresentados nas próximas seções, 5.2 e 5.3, em 22 tabelas. Estas tabelas estão estruturadas como descrito a seguir. A primeira linha contém o nome do prédio analisado. Depois, elas são divididas em 10 colunas. As duas primeiras contêm, respectivamente, o andar e ambiente onde foi gerado o arquivo de medidas. As próximas sete colunas mostram o erro percentual médio (ϵ) resultante do ajuste de cada uma das distribuições utilizadas. Entre elas, a oitava e a nona coluna têm um preenchimento diferente. Visto que se referem aos erros resultantes das distribuições κ - μ e η - μ , que, como já explicado, são distribuições complementares, apenas uma delas por vez será preenchida e conterá o valor do erro obtido para uma das distribuições κ - μ ou η - μ , a que melhor se aplicar ao arquivo em questão. A décima coluna apresenta o valor de $\Delta\epsilon$. Para facilitar as comparações visuais, o valor de ϵ_c será mostrado em negrito.

5.2 MEDIÇÕES *INTO BUILDINGS*

Como descrito na seção anterior, os resultados serão divididos em quantitativos — que se constituem em tabelas com os valores do erro percentual médio dos ambientes analisados — e qualitativos — os gráficos dos ajustes teóricos e experimentais. As análises sobre os resultados apresentados serão feitas apenas na seção 5.4, na qual também serão mostrados os resultados globais, considerando tanto as medições *Into* como as *Within buildings*.

5.2.1 Resultados quantitativos

Na sequência são apresentados os valores de erro percentual médio obtidos para os 145 ambientes *Into Buildings*, resultantes da utilização das diversas distribuições de desvanecimento em análise para ajustar as funções de distribuição cumulativa dos dados obtidos experimentalmente.

Tabela 5.1 – Erro percentual médio para o prédio FEEC/Bloco F, medições *Into Buildings*.

FEEC – Bloco F									
Andar	Ambiente	Erro percentual médio (%)							$\Delta\epsilon$ (%)
		Rayleigh	Rice	Nakagami	Hoyt	Weibull	$\kappa - \mu$	$\eta - \mu$	
Térreo	FE11	17.0	12.9	5.0	14.3	7.5	-	3.9	22
	FE12	16.0	17.1	46.6	17.4	32.2	-	9.7	39
	FE13	21.7	21.0	17.6	21.1	13.9	-	2.5	82
	Corredor direito	7.9	9.6	24.3	9.9	11.1	-	2.2	72
	Corredor frente	15.1	14.8	13.1	14.8	13.6	-	2.4	82
1º Andar	FE21	10.9	10.9	13.0	10.9	11.9	-	2.5	77
	FE22	12.9	12.9	12.9	12.9	6.7	-	5.1	24
	FE23	13.4	6.5	11.9	9.3	5.5	3.0	-	46
	Corredor direito	7.4	7.4	8.1	7.4	8.0	-	2.2	71

Tabela 5.2 – Erro percentual médio para o prédio FEEC/Pós-graduação, medições *Into Buildings*.

FEEC – Pós-graduação									
Andar	Ambiente	Erro percentual médio (%)							$\Delta\epsilon$ (%)
		Rayleigh	Rice	Nakagami	Hoyt	Weibull	$\kappa - \mu$	$\eta - \mu$	
Térreo	PE11	12.4	10.0	6.7	10.7	8.6	6.1	-	09
	Anexa PE11	10.5	11.0	13.1	11.0	8.1	-	7.5	07
	PE15	16.0	5.5	21.9	9.9	3.8	3.9	-	-02
	Corredor direito	6.6	6.5	6.5	6.5	5.5	5.9	-	-09
1º Andar	PE21	7.8	9.4	20.9	9.5	6.2	-	2.5	59
	PE27	7.0	6.5	16.5	6.4	10.6	-	3.5	45
	PE29	17.3	12.7	7.4	14.3	8.0	6.5	-	12
	Corredor direito	5.9	5.5	15.2	4.9	5.5	5.5	-	-12
	Corredor PE21	10.0	10.2	16.1	10.2	11.7	-	2.4	76
2º Andar	PE30	9.4	6.5	26.2	4.7	9.0	5.6	-	-17
	PE31	5.1	2.3	13.3	2.9	4.1	2.2	-	02
	lado PE31	3.8	6.8	22.5	4.9	10.0	3.5	-	08
	PE32	15.5	15.2	13.6	15.2	6.0	-	5.7	04
	PE34	6.4	8.7	47.8	9.1	12.9	-	4.7	27
	PE36	16.5	18.4	34.2	18.6	19.0	-	5.0	69
	PE38	23.3	14.0	8.6	18.2	5.7	3.9	-	32
	Defesa de Tese	10.3	7.9	15.3	8.2	7.7	7.3	-	05
	Anexa Def. Tese	10.4	10.4	9.9	10.4	3.4	-	2.7	19
	Corredor PE30	22.3	26.0	50.5	26.7	21.1	-	3.5	83
	Corredor PE31	15.6	5.8	20.3	9.9	4.9	4.4	-	10

Tabela 5.3 – Erro percentual médio para o prédio FEEC/Oficina, medições *Into Buildings*.

FEEC – Oficina									
Andar	Ambiente	Erro percentual médio (%)							$\Delta\epsilon$ (%)
		Rayleigh	Rice	Nakagami	Hoyt	Weibull	$\kappa - \mu$	$\eta - \mu$	
Térreo	Sala	16.1	14.1	7.0	14.7	12.2	-	2.0	71

Tabela 5.4 – Erro percentual médio para o prédio FEEC/Bloco G2, medições *Into Buildings*.

FEEC – Bloco G2									
Andar	Ambiente	Erro percentual médio (%)							$\Delta\epsilon$ (%)
		Rayleigh	Rice	Nakagami	Hoyt	Weibull	$\kappa - \mu$	$\eta - \mu$	
Térreo	Sala1	12.1	13.2	64.6	12.8	27.5	-	6.9	43
	Sala2	9.0	8.8	23.9	8.6	13.2	-	3.7	57
	Sala3	14.5	14.3	23.8	14.3	18.8	-	1.2	91
	Sala4	15.6	16.2	19.9	16.2	14.4	-	4.1	72
1º Andar	Sala1	8.5	8.7	13.0	8.7	9.8	-	2.6	70
	Sala2	10.8	10.7	21.3	10.1	8.8	10.3	-	-17

Tabela 5.5 – Erro percentual médio para o prédio FEEC/Demic, medições *Into Buildings*.

FEEC – Demic									
Andar	Ambiente	Erro percentual médio (%)							$\Delta\epsilon$ (%)
		Rayleigh	Rice	Nakagami	Hoyt	Weibull	$\kappa - \mu$	$\eta - \mu$	
Térreo	Wisstek	8.2	8.8	12.0	8.8	5.8	-	4.4	23
	Optical	9.0	8.4	9.2	8.4	8.2	-	7.7	06
	Sala26	14.6	12.1	92.2	5.7	20.4	-	5.5	03
	Sala28	11.0	8.9	38.7	7.4	19.3	-	7.4	01
	Sala21	9.1	8.3	7.2	8.5	8.0	-	6.7	07
	Sala24	24.2	19.5	10.0	21.1	14.3	-	5.5	45
	Sala micros	9.4	9.5	8.4	9.5	9.8	-	5.0	41

Tabela 5.6 – Erro percentual médio para o prédio Ginásio, medições *Into Buildings*.

Ginásio									
Andar	Ambiente	Erro percentual médio (%)							$\Delta\epsilon$ (%)
		Rayleigh	Rice	Nakagami	Hoyt	Weibull	$\kappa - \mu$	$\eta - \mu$	
Térreo	ginásio 100k	22.6	21.8	17.4	22.0	20.9	-	6.3	64
	ginásio 200k	22.9	21.6	16.5	21.9	20.5	-	5.7	66
	ginásio 300k	26.8	27.0	27.7	27.0	26.4	-	1.2	95
	ginásio 400k	16.8	17.1	19.4	17.1	17.7	-	1.2	93
	ginásio 500k	16.4	16.6	21.4	16.6	19.1	-	2.8	83
	ginásio 600k	20.7	20.6	20.2	20.7	20.7	-	2.7	86
	ginásio 700k	26.5	26.0	22.7	26.1	25.9	-	3.9	83
	ginásio 800k	30.2	30.0	28.9	30.1	30.2	-	5.2	82
	ginásio 900k	20.8	20.6	18.4	20.6	20.6	-	4.7	74
	ginásio 1000k	27.8	27.7	27.3	27.7	27.1	-	2.8	90

Tabela 5.7 – Erro percentual médio para o prédio Ciclo Básico II, medições *Into Buildings*.

Ciclo Básico II									
Andar	Ambiente	Erro percentual médio (%)							$\Delta\epsilon$ (%)
		Rayleigh	Rice	Nakagami	Hoyt	Weibull	$\kappa - \mu$	$\eta - \mu$	
Térreo	Hall interno	22.7	21.6	16.8	21.8	19.6	-	5.4	68
1º Andar	PB01	20.8	21.6	25.8	21.6	20.1	-	4.0	80
	PB02	28.3	28.8	32.0	28.8	27.9	-	4.1	85
	PB03	18.5	18.5	18.4	18.5	18.9	-	5.6	69
	PB04	17.6	16.2	11.2	16.6	15.4	-	3.3	71
	PB05	18.5	19.2	43.4	19.3	27.7	-	2.5	86
	PB06	5.6	5.6	17.0	5.5	8.6	-	3.7	33
	Corredor frente	20.8	13.6	12.2	16.1	10.0	10.4	-	-04
	Corredor fundo	11.9	11.8	19.7	11.0	10.7	11.8	-	-10
	PB07	21.6	20.4	16.5	20.3	18.8	-	13.3	19.5
	PB08	29.9	30.7	38.9	30.7	31.1	-	4.4	85
	PB09	28.2	28.8	34.9	28.9	28.5	-	7.8	72
	PB10	28.3	29.1	32.3	29.1	24.1	-	9.9	59
	PB11	42.9	41.0	34.0	41.4	37.2	-	8.0	76
	PB12	28.7	25.9	19.5	26.6	22.6	-	8.0	60
2º Andar	PB13	51.5	49.2	42.0	49.8	47.1	-	15.4	63
	PB14	23.2	23.2	22.7	23.2	22.1	-	5.0	77
	PB15	15.9	13.7	10.8	14.3	11.6	-	8.9	18
	PB16	23.5	21.3	13.8	21.9	19.3	-	5.6	59
	PB17	11.7	11.8	16.0	11.8	14.3	-	3.3	72
	PB18	12.2	12.2	12.1	12.2	13.7	-	8.0	34
	Corredor frente	18.0	15.1	8.1	15.9	10.4	-	4.4	45
	Corredor fundo	8.8	9.7	21.7	9.8	12.6	-	4.1	54

Tabela 5.8 – Erro percentual médio para o prédio FEC/Salas de aula, medições *Into Buildings*.

FEC – Salas de aula									
Andar	Ambiente	Erro percentual médio (%)							$\Delta\epsilon$ (%)
		Rayleigh	Rice	Nakagami	Hoyt	Weibull	$\kappa - \mu$	$\eta - \mu$	
Térreo	CA05	16.0	9.9	13.4	11.9	6.0	6.4	-	-06
	CA06	4.4	4.6	29.8	4.4	9.6	-	3.1	29
1º Andar	CA11	15.3	6.8	25.9	8.3	7.0	6.8	-	0.1
	CA12	7.1	18.0	59.6	12.3	18.3	-	2.6	64
	CA13	12.7	9.5	54.2	5.4	10.9	-	4.4	19
	CA14	18.6	12.7	7.9	14.8	8.8	7.5	-	06
2º Andar	CA21	27.5	11.3	26.6	18.3	7.7	8.9	-	-16
	CA22	14.7	12.1	77.5	7.8	19.3	-	7.4	05
	CA23	9.3	10.6	39.2	10.7	16.3	-	6.9	25
	CA28	6.9	6.3	7.1	6.3	6.5	-	2.7	57

3º Andar	CA31	30.5	9.4	30.1	19.8	7.9	7.6	-	03
	CA32	9.8	9.1	5.5	9.0	5.0	-	4.2	16
	CA33	14.9	13.6	92.0	9.6	30.8	-	8.4	13
	CA34	5.1	9.2	42.4	10.2	10.5	-	2.6	48
	CA35	11.8	14.3	62.8	14.9	23.6	-	7.6	35
	PG01	8.8	10.4	22.7	10.6	11.2	-	3.9	56
	PG02	16.9	15.7	9.8	15.9	12.5	-	1.5	85
	PG03	22.4	14.3	8.5	17.6	6.6	4.8	-	28

Tabela 5.9 – Erro percentual médio para o prédio FEQ/Bloco C, medições *Into Buildings*.

FEQ – Bloco C									
Andar	Ambiente	Erro percentual médio (%)							$\Delta\epsilon$ (%)
		Rayleigh	Rice	Nakagami	Hoyt	Weibull	$\kappa - \mu$	$\eta - \mu$	
Térreo	Hall entrada	6.7	9.5	33.1	10.0	6.0	-	5.1	15
	Corredor lab processos	15.0	14.3	28.7	14.1	22.6	-	2.4	83
	Corredor labgrad	18.7	11.6	15.1	13.7	7.8	7.6	-	03
	Lab grad1	16.6	16.6	16.1	16.6	18.8	-	7.9	51
	Lab grad2	8.2	10.6	46.2	11.2	23.7	-	3.2	77
	Lab grad3	13.1	12.8	20.5	12.7	15.1	-	2.9	60
	Lab grad4	10.4	6.4	13.1	7.5	4.6	4.7	-	-02
	Lab grad5	13.1	12.3	8.8	12.4	9.7	-	2.3	73
	Lab processos	7.7	7.6	7.7	7.6	8.2	-	4.7	39
1º Andar	EQ11	11.2	10.9	9.6	11.0	10.4	-	3.4	65
	EQ12	8.4	7.3	5.6	7.5	5.6	-	3.9	29
	Corredor labs	6.0	9.3	93.8	11.7	27.4	-	2.9	52
	Corredor salas	5.9	5.8	4.6	5.8	6.4	-	2.9	36
2º Andar	EQ21	6.4	6.5	9.5	6.5	6.4	-	4.0	37
	EQ22	17.6	16.7	12.4	16.8	14.7	-	2.8	77
	EQ23	16.6	17.7	26.8	17.8	18.6	-	5.6	66
	Corredor labs	4.6	4.7	5.3	4.7	3.8	-	3.1	28
	Corredor salas	8.4	7.2	4.4	7.4	6.3	-	3.2	19.6

Tabela 5.10 – Erro percentual médio para o prédio FEQ/Bloco D, medições *Into Buildings*.

FEQ – Bloco D									
Andar	Ambiente	Erro percentual médio (%)							$\Delta\epsilon$ (%)
		Rayleigh	Rice	Nakagami	Hoyt	Weibull	$\kappa - \mu$	$\eta - \mu$	
Térreo	Corredor labs	7.6	7.6	26.7	7.4	13.2	--	6.1	18
	Lab1	9.8	9.6	7.9	9.6	10.7	-	2.8	65
	Lab2	7.5	9.6	36.9	10.1	11.8	-	5.3	30
	Corredor salas	10.0	10.4	13.6	10.4	12.3	-	2.8	72
	PG01	13.8	9.1	7.7	10.6	5.5	5.0	-	08
	PG02	19.9	14.9	7.6	16.7	7.9	-	5.9	23
	PG03	20.6	12.8	12.7	15.7	10.1	10.6	-	-05
	PG04	9.9	9.6	8.0	9.7	6.6	-	3.0	55
	PG05	11.7	10.9	25.6	10.6	14.1	-	3.8	64
1º Andar	Defesa de tese	11.6	7.0	8.8	8.6	5.0	5.8	-	-15
	Secretaria	12.7	13.5	25.9	13.5	17.5	-	3.8	70
	Coordenação	7.3	7.5	9.2	7.5	8.2	-	3.0	58
	Corredor secretaria	13.3	18.9	161.4	28.7	43.3	-	17.3	-30
	Corredor labs	11.3	13.6	56.5	14.4	25.4	-	3.9	65
2º Andar	Corredor labs	13.2	14.5	96.9	14.2	39.9	-	5.5	58
	Anfiteatro	23.8	20.2	9.0	21.3	14.2	-	2.9	68

Tabela 5.11 – Erro percentual médio para o prédio FEM/Bloco A, medições *Into Buildings*.

FEM – Bloco A									
Andar	Ambiente	Erro percentual médio (%)							$\Delta\epsilon$ (%)
		Rayleigh	Rice	Nakagami	Hoyt	Weibull	$\kappa - \mu$	$\eta - \mu$	
Térreo	FEA11	19.3	7.9	23.9	11.9	7.2	6.8	-	06
	FEA12	6.9	12.2	74.7	14.6	17.7	-	3.6	48
	FEA14	17.3	18.5	26.1	18.6	10.8	-	8.4	21
	FEA15	5.1	4.2	7.3	4.2	4.1	3.8	-	06
	Corredor interno	20.4	7.6	19.9	13.6	4.9	5.1	-	-03
1º Andar	EM21	5.6	5.3	5.3	5.3	5.0	-	2.8	43
	EM22	6.6	6.0	9.3	6.0	6.5	-	2.7	55
	EM24	3.5	5.5	16.9	4.1	5.6	3.4	-	03
	EM25	21.3	17.0	5.6	18.4	10.8	-	4.4	22
	Corredor interno	15.6	6.6	18.4	9.8	6.2	6.2	-	-0.3

2º Andar	EM31	14.4	10.9	50.2	7.2	4.2	-	3.1	28
	EM32	9.4	9.4	8.2	9.4	8.9	-	5.2	37
	FEA33	5.4	5.0	11.9	4.9	10.0	-	3.1	38
	FEA36	10.5	6.7	14.4	7.3	4.8	5.4	-	-13
	FEA37	3.6	4.0	9.2	4.0	7.6	-	2.5	31
	FEA38	6.7	7.5	12.1	7.3	6.7	7.5	-	-11
	Corredor interno	23.3	16.9	4.9	19.5	5.6	-	3.8	21

5.2.2 Resultados qualitativos

Na sequência são apresentados gráficos com ajustes de alguns ambientes *Into Buildings*. Foi selecionado um gráfico por prédio avaliado, sendo escolhido, em cada um deles, o ambiente no qual as distribuições μ resultaram na maior diminuição do erro ou aquele em que elas apresentaram o menor valor de erro relativo médio.

Como já explicado na seção 5.1.6, em cada gráfico serão apresentados os pontos resultantes das medidas de campo, o pior e o melhor ajuste entre as distribuições tradicionais, e o ajuste de uma das distribuições μ , a que for aplicável ao ambiente em questão.

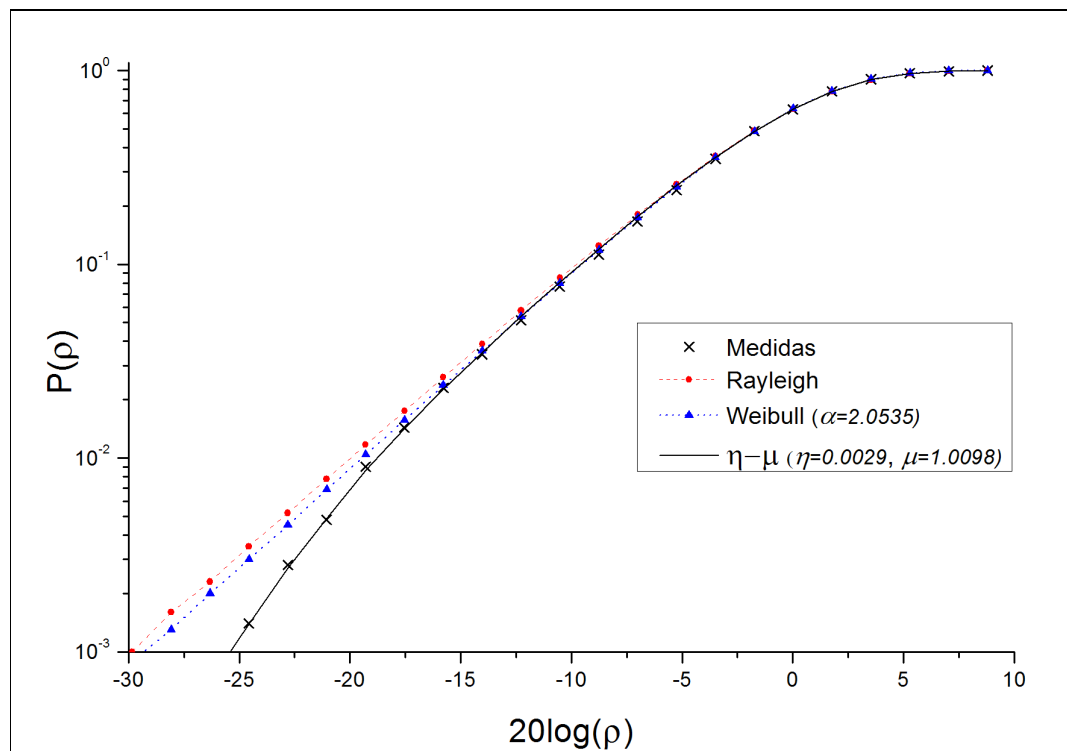


Figura 5.1 – Ajuste FEEC/Bloco F/FE13, medições *Into buildings*.

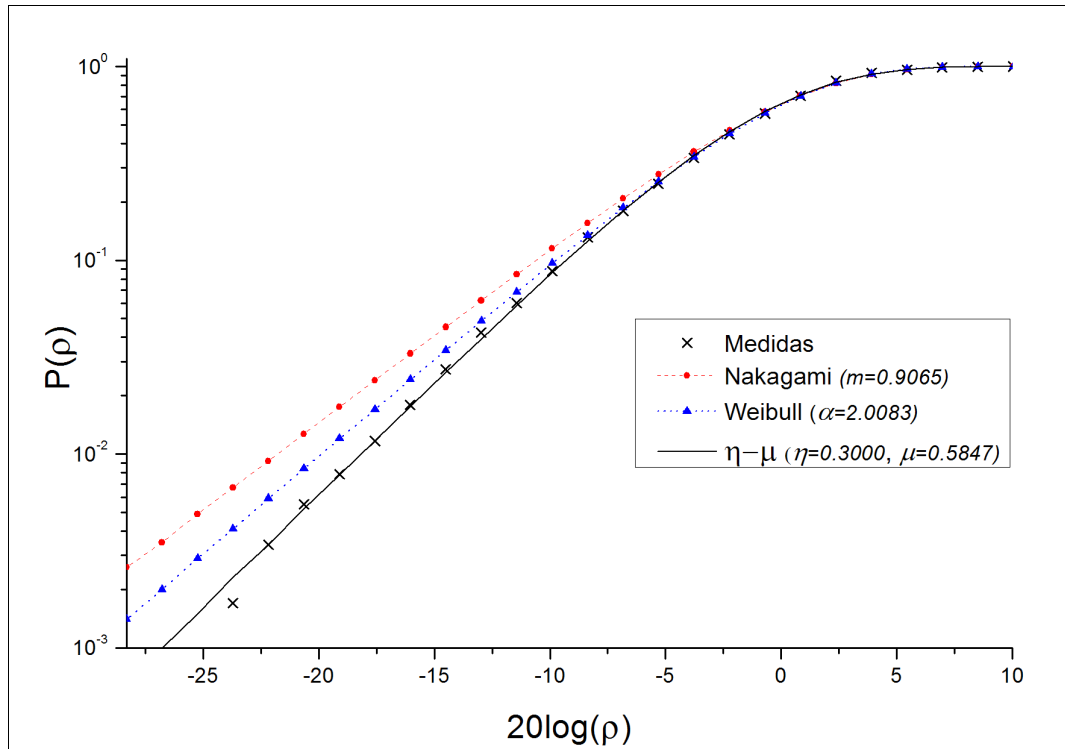


Figura 5.2 – Ajuste FEEC/Pós-graduação/Corredor direito (2° andar), medições *Into buildings*.

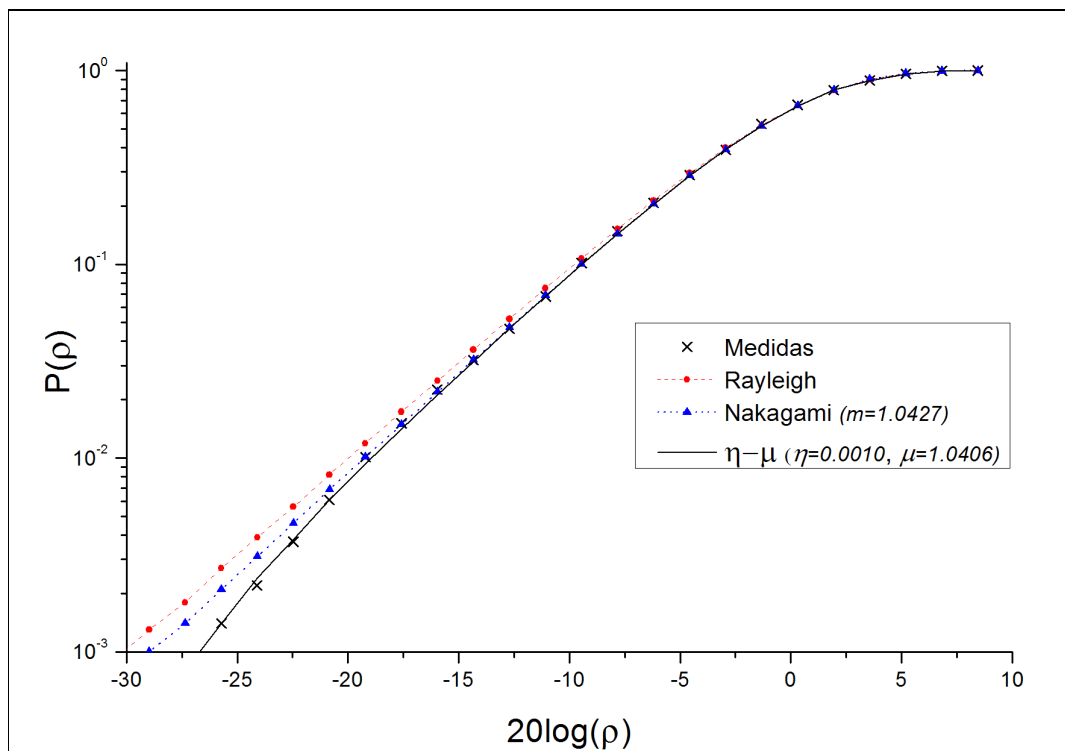


Figura 5.3 – Ajuste FEEC/Oficina, medições *Into buildings*.

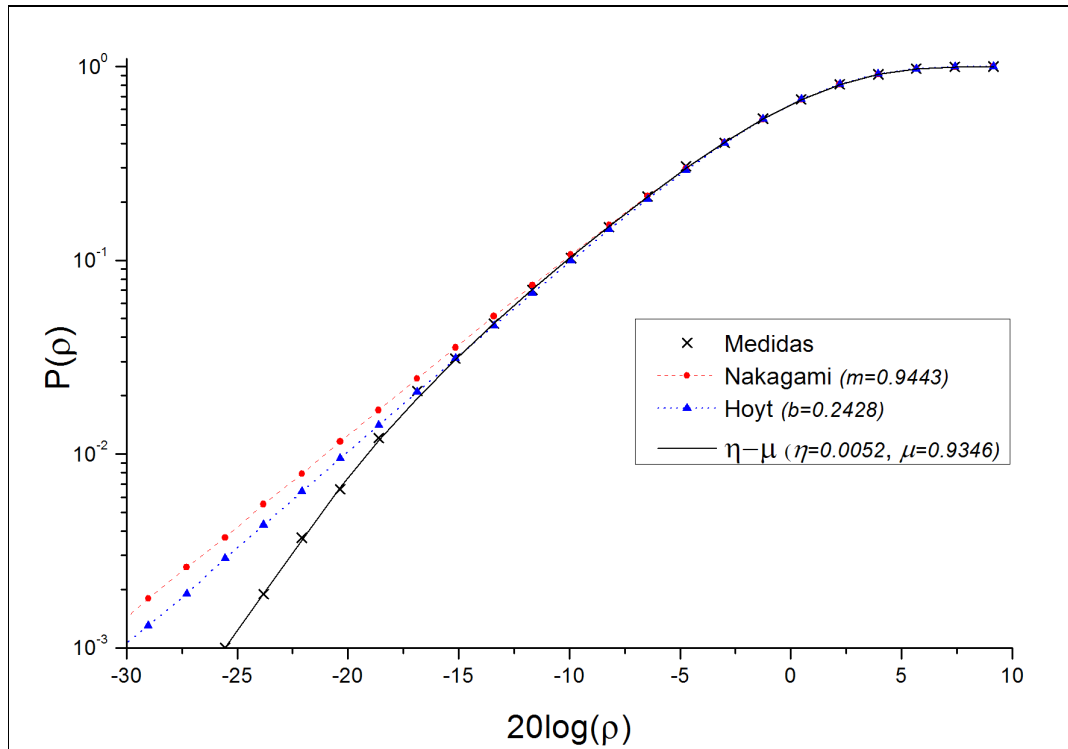


Figura 5.4 – Ajuste FEEC/Bloco G2/Sala 3, medições *Into buildings*.

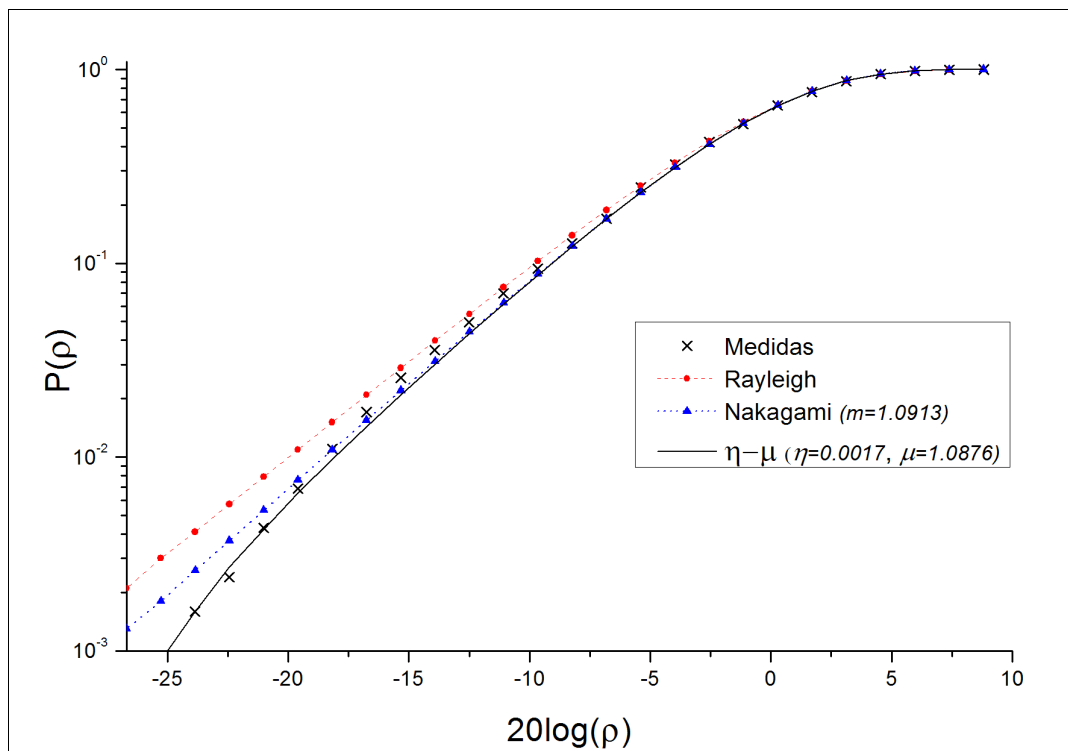


Figura 5.5 – Ajuste FEEC/Demic/Sala 24, medições *Into buildings*.

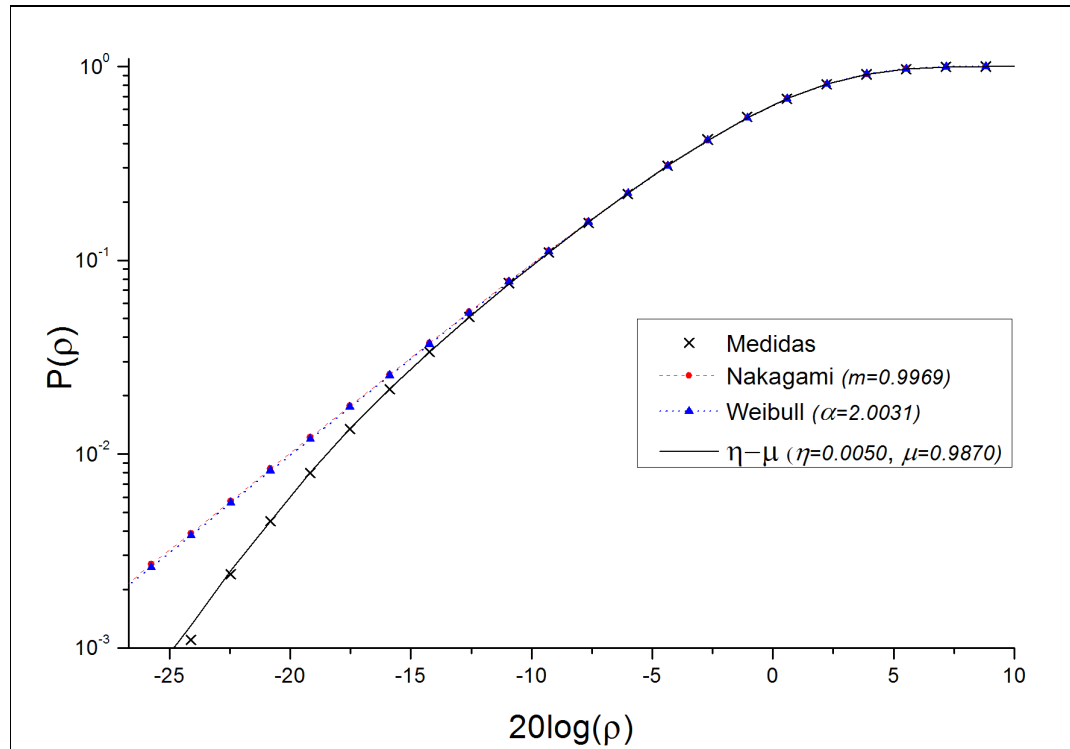


Figura 5.6 – Ajuste Ginásio/ginásio 300k, medições *Into buildings*.

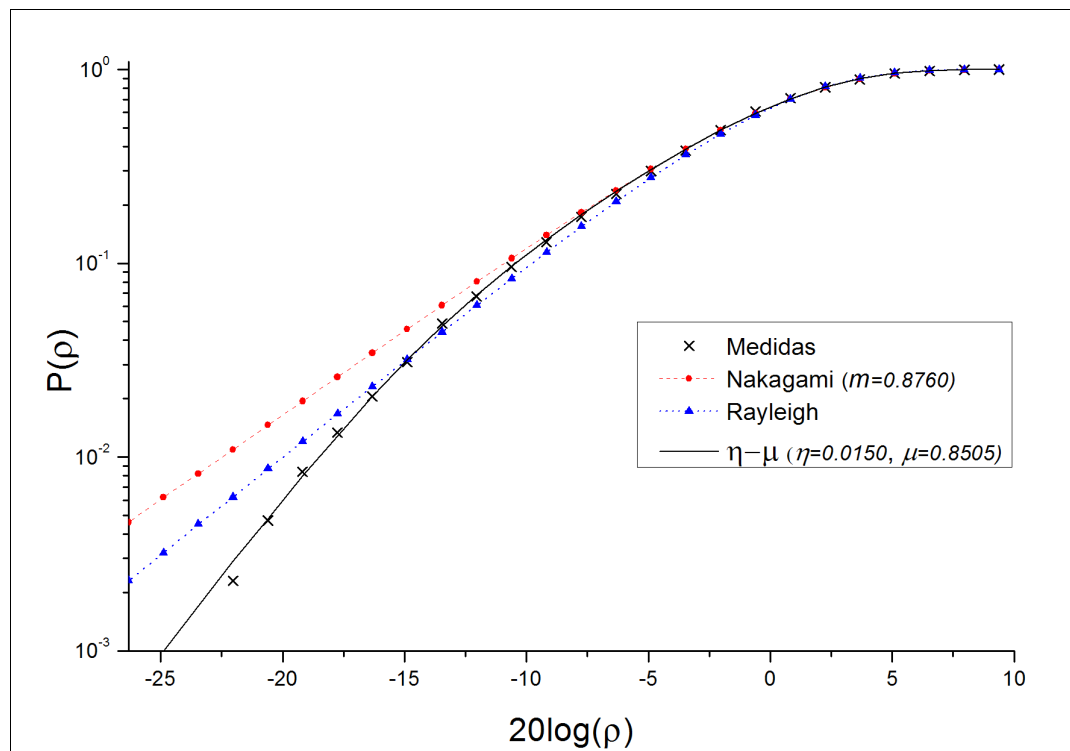


Figura 5.7 – Ajuste Ciclo Básico II/PB05, medições *Into buildings*.

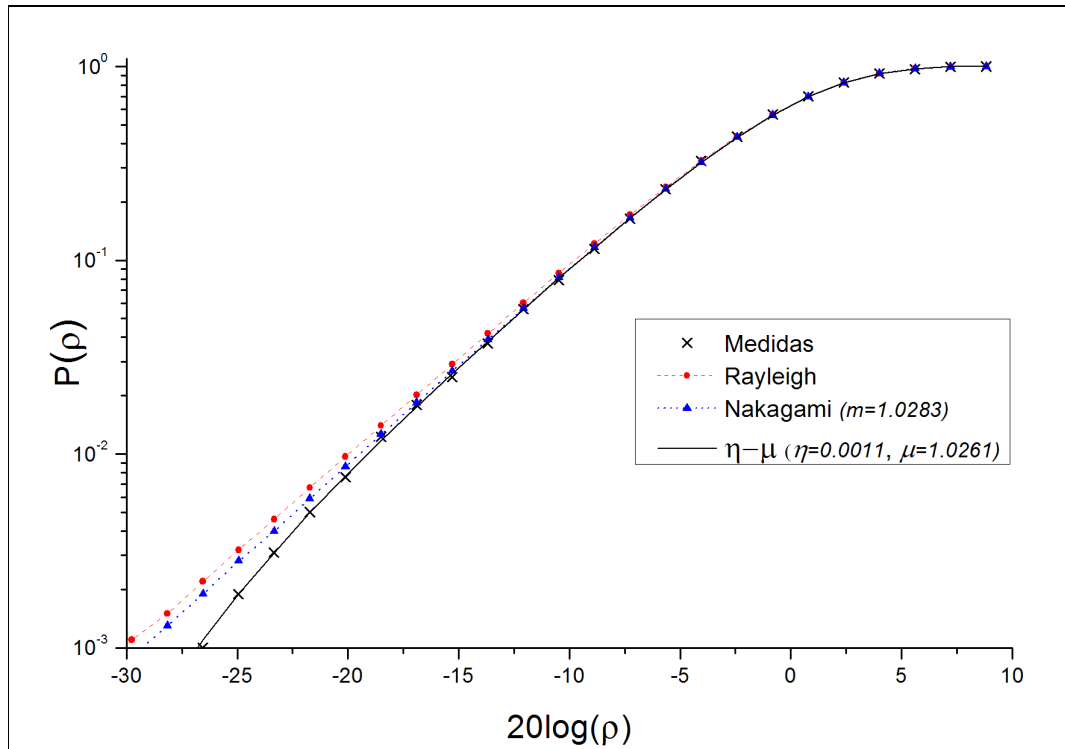


Figura 5.8 – Ajuste FEC/Salas de aula/PG02, medições *Into buildings*.

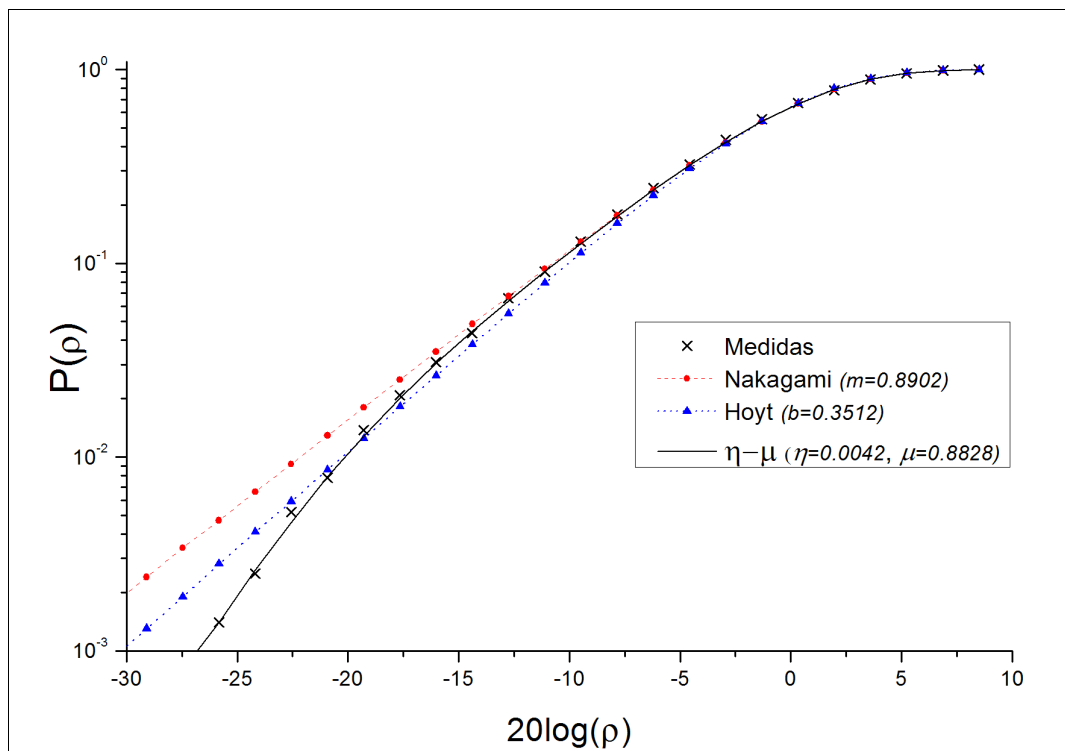


Figura 5.9 – Ajuste FEQ/Bloco C/Corredor processos, medições *Into buildings*.

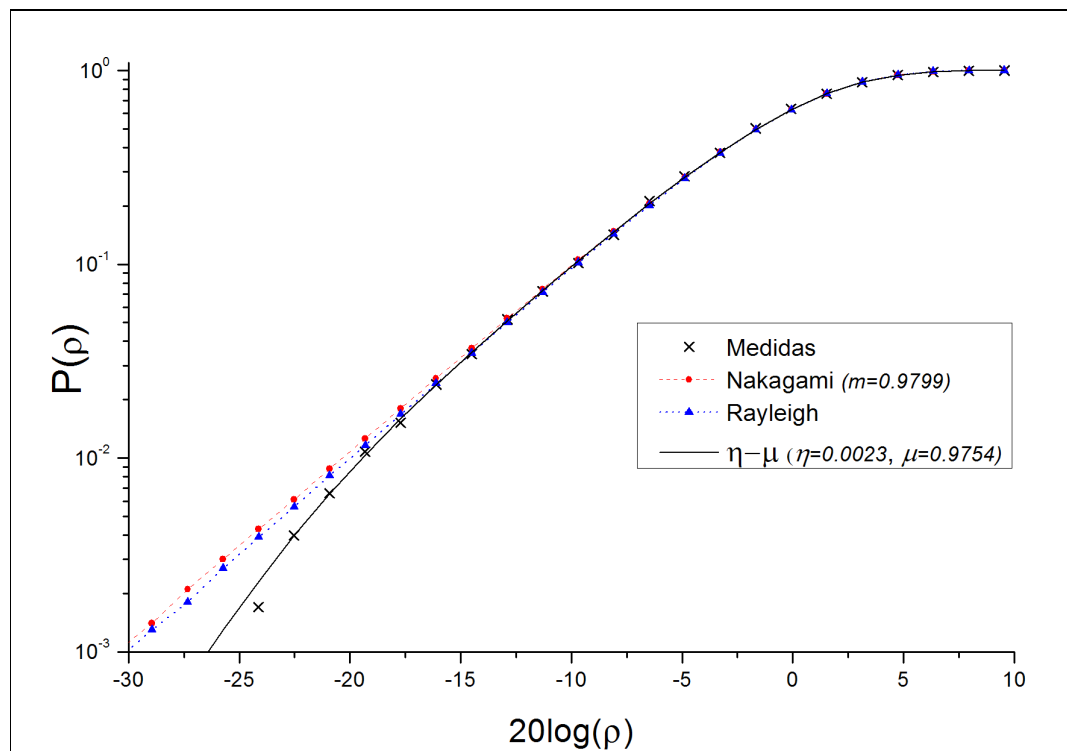


Figura 5.10 – Ajuste FEQ/Bloco D/corredor salas, medições *Into buildings*.

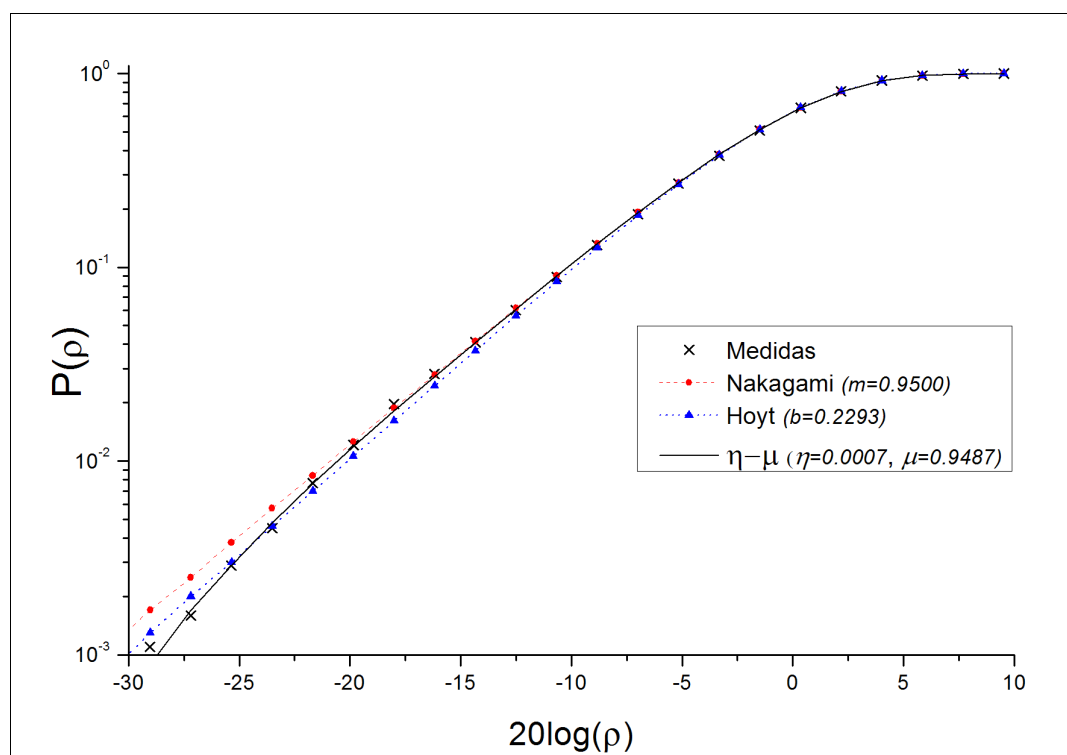


Figura 5.11 – Ajuste FEM/Bloco A/EM22, medições *Into buildings*.

5.3 MEDIÇÕES *WITHIN BUILDINGS*

Da mesma forma que nas medições *Into buildings*, os resultados estão divididos em quantitativos e qualitativos, e as análises serão feitas na seção 5.4.

5.3.1 Resultados quantitativos

Na sequência são apresentados os resultados de erro percentual médio obtidos para os 147 ambientes *Within Buildings*, resultantes da utilização das diversas distribuições de desvanecimento em análise para ajustar as funções de distribuição cumulativa obtidas experimentalmente.

Tabela 5.12 – Erro percentual médio para o prédio FEEC/Bloco F, medições *Within Buildings*.

FEEC – Bloco F									
Andar	Ambiente	Erro percentual médio (%)							$\Delta\epsilon$ (%)
		Rayleigh	Rice	Nakagami	Hoyt	Weibull	$\kappa - \mu$	$\eta - \mu$	
Térreo	FE11	3.1	3.0	9.5	3.0	3.0	-	2.9	02
	FE12	12.1	13.5	20.8	13.6	10.3	-	5.9	43
	FE13	10.3	9.9	17.9	9.8	12.3	-	3.5	65
	Corredor direita	11.2	9.4	2.9	9.8	5.3	-	2.2	24
	Corredor frente	7.1	9.3	23.9	7.9	7.6	9.2	-	-30
1º Andar	FE21	12.0	15.3	156.8	24.3	27.7	-	22.0	-84
	FE22	62.3	7.2	35.3	43.1	12.3	6.0	-	17
	FE23	12.2	12.1	23.9	12.1	18.5	-	3.8	69
	Corredor direita	10.1	8.8	10.7	9.0	7.2	7.0	-	02

Tabela 5.13 – Erro percentual médio para o prédio FEEC/Pós-graduação, medições *Within Buildings*.

FEEC – Pós-graduação									
Andar	Ambiente	Erro percentual médio (%)							$\Delta\epsilon$ (%)
		Rayleigh	Rice	Nakagami	Hoyt	Weibull	$\kappa - \mu$	$\eta - \mu$	
Térreo	PE11	13.4	11.3	69.0	8.0	17.6	-	7.6	04
	Anexa PE11	13.2	8.1	15.6	9.1	5.9	7.1	-	-19
	PE15	31.4	29.3	20.5	29.8	15.6	-	8.7	44
	Corredor direita	21.9	13.9	14.5	16.6	7.2	6.7	-	07

1º Andar	PE21	4.6	4.6	8.5	4.6	6.1	-	1.7	63
	PE29	185.9	15.4	39.6	140.0	17.4	4.5	-	71
	Corredor direita	59.0	30.7	19.0	45.7	17.9	13.9	-	22
	Corredor PE21	11.5	5.6	28.8	5.0	7.4	4.9	-	01
2º Andar	PE30	32.0	29.2	19.3	30.0	10.3	-	3.7	64
	PE31	18.2	17.5	12.9	17.8	17.0	-	11.0	15
	lado PE31	22.8	18.9	10.7	20.0	14.9	-	6.3	41
	PE32	16.1	16.3	20.6	16.3	18.1	-	3.0	81
	PE34	15.3	14.8	44.7	14.2	24.8	-	6.0	58
	PE36	19.9	19.8	18.6	19.8	21.3	-	8.4	55
	PE38	6.2	6.1	29.7	5.7	9.8	-	5.2	10
	Defesa de Tese	8.6	7.6	10.7	7.6	8.2	7.6	-	-01
	Anexa Def. Tese	9.7	11.1	25.9	11.2	16.7	-	5.1	47
	Corredor PE30	26.4	14.0	16.3	19.4	8.6	8.4	-	02
	Corredor PE31	5.5	4.1	18.2	3.5	4.4	4.0	-	-13

Tabela 5.14 – Erro percentual médio para o prédio FEEC/Oficina, medições *Within Buildings*.

FEEC – Oficina									
Andar	Ambiente	Erro percentual médio (%)							$\Delta\epsilon$ (%)
		Rayleigh	Rice	Nakagami	Hoyt	Weibull	$\kappa - \mu$	$\eta - \mu$	
Térreo	Sala	27.0	21.4	5.1	23.4	9.6	-	2.1	59

Tabela 5.15 – Erro percentual médio para o prédio FEEC/Bloco G2, medições *Within Buildings*.

FEEC – Bloco G2									
Andar	Ambiente	Erro percentual médio (%)							$\Delta\epsilon$ (%)
		Rayleigh	Rice	Nakagami	Hoyt	Weibull	$\kappa - \mu$	$\eta - \mu$	
Térreo	Sala1	18.6	5.9	23.8	11.5	4.8	4.6	-	04
	Sala2	6.9	6.0	19.6	5.1	6.5	5.5	-	-09
	Sala3	15.3	15.3	23.1	15.3	19.9	-	2.1	86
	Sala4	15.8	12.5	11.4	13.2	10.4	10.6	-	-02
1º Andar	Sala1	8.7	9.5	54.2	9.1	20.0	-	4.7	45
	Sala2	12.4	10.1	28.3	8.1	6.9	-	5.8	16

Tabela 5.16 – Erro percentual médio para o prédio FEEC/Demic, medições *Within Buildings*.

FEEC – Demic									
Andar	Ambiente	Erro percentual médio (%)							$\Delta\epsilon$ (%)
		Rayleigh	Rice	Nakagami	Hoyt	Weibull	$\kappa - \mu$	$\eta - \mu$	
Térreo	Wisstek	63.0	20.3	26.4	47.2	10.8	5.6	-	48
	Optinet	5.6	3.0	13.5	3.3	4.0	3.0	-	0.03
	Sala26	18.6	16.5	43.4	14.5	22.3	-	4.8	67
	Sala28	28.6	9.9	29.5	18.2	8.1	9.5	-	-18
	Sala21	25.2	14.2	13.0	19.2	6.6	6.3	-	05
	Sala24	13.4	12.6	18.9	12.4	10.1	10.3	-	-02
	Sala micros	28.8	20.2	7.8	23.8	10.5	7.0	-	10

Tabela 5.17 – Erro percentual médio para o prédio Ginásio, medições *Within Buildings*.

Ginásio									
Andar	Ambiente	Erro percentual médio (%)							$\Delta\epsilon$ (%)
		Rayleigh	Rice	Nakagami	Hoyt	Weibull	$\kappa - \mu$	$\eta - \mu$	
Quadra	Ginásio	171.9	14.1	46.6	124.9	27.9	4.5	-	68
	Ginásio meio	577.6	10.5	42.3	435.2	23.0	2.3	-	78
	Ginásio porta	39.8	7.2	30.3	27.1	10.0	3.8	-	48

Tabela 5.18 – Erro percentual médio para o prédio Ciclo Básico II, medições *Within Buildings*.

Ciclo Básico II									
Andar	Ambiente	Erro percentual médio (%)							$\Delta\epsilon$ (%)
		Rayleigh	Rice	Nakagami	Hoyt	Weibull	$\kappa - \mu$	$\eta - \mu$	
Térreo	Hall interno	34.0	28.4	13.5	30.3	20.5	-	3.6	73
1º Andar	PB01	8.9	8.0	6.4	8.2	6.8	-	5.7	11
	PB02	32.8	23.9	7.3	27.7	13.0	-	4.7	35
	PB03	42.8	13.0	31.0	30.1	5.5	6.9	-	-25
	PB04	107.7	8.9	38.6	78.7	15.1	3.1	-	65
	PB05	40.6	11.7	27.0	28.6	6.4	5.6	-	13
	PB06	8.7	9.8	18.0	9.2	8.9	9.8	-	-13
	Corredor PB01	43.9	18.6	18.7	33.0	6.4	6.2	-	02
	Corredor PB07	7.5	9.7	19.5	8.7	8.7	8.8	-	-17
	PB07	7.8	7.8	28.1	4.3	9.6	6.4	-	-49
	PB08	23.6	18.4	7.9	20.2	10.0	-	5.1	35
	PB09	52.9	5.8	41.7	35.1	17.4	5.6	-	02
	PB10	9.1	7.5	3.8	7.9	4.7	-	2.3	39
	PB11	22.8	13.2	12.5	16.9	7.3	6.2	-	15
	PB12	9.6	10.0	10.8	9.9	11.1	-	9.1	05

2º Andar	PB13	20.6	20.9	30.4	21.0	27.0	-	3.7	82
	PB14	13.0	13.1	13.1	13.1	13.3	-	9.4	27
	PB15	11.2	11.2	11.5	11.2	13.0	-	2.7	76
	PB16	17.9	8.6	19.7	11.6	4.6	6.1	-	-32
	PB17	21.1	21.3	22.8	21.3	12.3	-	6.8	45
	PB18	6.8	6.4	11.7	6.4	5.3	5.4	-	-02
	Corredor frente	16.4	13.8	9.2	14.4	12.0	-	8.1	11
	Corredor PB13	14.2	8.1	22.6	8.3	7.2	8.0	-	-12

Tabela 5.19 – Erro percentual médio para o prédio FEC/Salas de aula, medições *Within Buildings*.

FEC – Salas de aula									
Andar	Ambiente	Erro percentual médio (%)							$\Delta\epsilon$ (%)
		Rayleigh	Rice	Nakagami	Hoyt	Weibull	$\kappa - \mu$	$\eta - \mu$	
Térreo	Auditório	5.5	6.1	39.9	6.0	8.7	-	4.1	27
	Sala	20.1	16.0	8.5	17.3	11.5	-	6.2	27
	Corredor frente	9.5	12.1	103.1	15.3	26.3	-	3.2	66
	Corredor lateral	27.1	22.4	10.7	24.0	16.3	-	3.6	66
1º Andar	CA11	33.0	21.1	9.8	26.5	12.4	8.6	-	13
	CA12	26.8	20.6	15.0	22.5	16.9	-	13.5	10
	CA13	38.0	26.5	10.0	31.6	15.8	-	7.9	22
	CA14	7.9	9.0	43.9	9.1	13.1	-	5.8	27
	Corredor frente	26.4	20.2	10.8	22.1	15.1	-	9.2	15
	Corredor lateral	21.4	21.9	30.0	22.0	24.6	-	2.5	88
2º Andar	CA21	27.6	19.2	6.0	22.8	8.7	-	5.8	04
	CA22	16.7	15.1	7.9	15.5	13.3	-	2.1	74
	CA23	26.2	12.8	14.5	19.3	4.3	4.4	-	-03
	CA28	19.9	20.7	26.0	20.7	19.8	-	4.8	76
	Corredor frente	5.7	6.4	9.1	6.2	5.6	6.4	-	-14
	Corredor lateral	17.2	17.8	24.6	17.9	20.5	-	3.6	79
3º Andar	CA31	30.7	24.2	10.1	26.7	13.7	-	5.1	49
	CA32	11.4	11.2	16.0	11.2	14.0	-	2.6	76
	CA33	12.2	12.8	16.8	12.8	10.1	-	2.7	73
	CA34	7.3	7.3	41.7	6.5	16.3	-	4.3	34
	CA35	22.3	18.4	8.1	19.7	12.2	-	3.1	62
	PG01	15.1	17.9	72.9	18.7	28.6	-	6.0	61
	PG02	23.2	23.9	30.1	23.9	28.5	-	4.1	82
	PG03	16.9	20.9	181.2	29.7	43.1	-	20.9	-24
	Corredor frente	7.3	5.4	20.5	4.8	6.4	5.3	-	-11
	Corredor lateral	22.0	24.2	40.8	24.6	32.4	-	6.3	71

Tabela 5.20 – Erro percentual médio para o prédio FEQ/Bloco C, medições *Within Buildings*.

FEQ – Bloco C									
Andar	Ambiente	Erro percentual médio (%)							$\Delta\epsilon$ (%)
		Rayleigh	Rice	Nakagami	Hoyt	Weibull	$\kappa - \mu$	$\eta - \mu$	
Térreo	Hall entrada	17.8	20.0	68.2	20.8	35.6	-	5.0	72
	Corredor lab processos	18.9	16.6	7.7	17.2	11.3	-	2.1	73
	Corredor labgrad	13.1	13.1	11.2	13.0	12.5	-	9.3	17
	Lab grad1	32.9	17.2	13.7	25.1	9.5	8.7	-	08
	Lab grad2	18.0	9.9	11.6	13.4	6.9	6.7	-	02
	Lab grad3	22.8	22.9	23.7	22.9	16.9	-	4.4	74
	Lab grad4	10.1	10.7	16.9	10.0	8.9	10.2	-	-15
	Lab grad5	24.8	15.3	8.9	19.4	7.9	6.4	-	19
1º Andar	Lab processos	11.7	10.3	22.3	9.8	13.6	-	3.3	66
	EQ11	18.2	12.3	5.7	14.8	6.8	5.1	-	11
	EQ12	16.2	16.0	15.4	16.0	7.5	-	5.2	66
	Corredor labs	26.5	28.0	41.3	28.2	31.8	-	4.4	83
2º Andar	Corredor salas	6.1	6.8	8.6	6.6	5.9	6.7	-	-14
	EQ21	7.6	7.3	5.9	7.3	4.8	-	3.4	30
	EQ22	13.1	13.9	18.3	13.9	5.2	-	5.4	-03
	EQ23	9.6	10.8	18.7	10.9	9.0	-	5.5	39
	Corredor labs	10.9	10.8	10.0	10.8	9.8	-	4.2	57
	Corredor salas	83.1	6.1	40.6	59.1	14.8	2.8	-	55

Tabela 5.21 – Erro percentual médio para o prédio FEQ/Bloco D, medições *Within Buildings*.

FEQ – Bloco D									
Andar	Ambiente	Erro percentual médio (%)							$\Delta\epsilon$ (%)
		Rayleigh	Rice	Nakagami	Hoyt	Weibull	$\kappa - \mu$	$\eta - \mu$	
Térreo	Lab1	6.9	7.3	11.6	6.7	6.5	7.2	-	-12
	Lab2	21.4	21.7	23.1	21.7	19.7	-	2.1	89
	Corredor salas	28.4	11.9	19.2	20.5	6.2	2.8	-	55
	PG01	3.8	4.0	5.2	4.0	4.7	-	2.4	37
	PG02	18.4	6.6	19.2	12.1	7.7	4.7	-	29
	PG03	16.8	14.3	5.5	15.0	3.9	-	3.5	10
	PG04	58.3	17.3	29.0	42.9	9.2	4.5	-	51
	PG05	21.9	22.8	29.9	22.8	25.2	-	4.8	78

1º Andar	Defesa de tese	13.6	11.2	10.4	11.6	9.7	-	9.5	02
	Secretaria	37.8	30.6	8.9	33.4	10.9	-	3.0	66
	Coordenação	6.7	5.6	27.2	5.1	17.3	-	4.6	09
	Corredor secretaria	11.3	11.8	12.8	11.7	11.4	-	10.4	08
	Corredor labs	58.7	13.5	31.3	41.5	12.7	11.5	-	09
2º Andar	Corredor labs	34.4	34.1	32.0	34.2	35.0	-	4.8	85
	Anfiteatro	17.8	10.4	9.4	13.4	4.2	3.9	-	08

Tabela 5.22 – Erro percentual médio para o prédio FEM/Bloco A, medições *Within Buildings*.

FEM – Bloco A									
Andar	Ambiente	Erro percentual médio (%)							$\Delta\epsilon$ (%)
		Rayleigh	Rice	Nakagami	Hoyt	Weibull	$\kappa - \mu$	$\eta - \mu$	
Térreo	FEA11	23.0	24.3	35.1	24.4	25.1	-	4.9	79
	FEA12	21.8	13.3	8.2	16.6	7.7	4.7	-	39
	FEA14	10.0	9.2	6.7	9.4	7.8	-	2.7	60
	FEA15	13.5	13.4	14.1	13.4	14.7	-	6.5	52
	Corredor FEA12	16.4	15.9	71.0	14.7	28.8	-	5.1	65
	Corredor FEA15	12.7	13.4	17.5	13.5	11.7	-	2.9	75
1º Andar	EM21	36.2	31.7	17.1	33.2	9.3	-	6.1	35
	EM22	14.8	14.8	15.6	14.8	16.2	-	2.4	84
	EM24	6.4	8.3	23.3	6.1	8.8	7.3	-	-20
	EM25	21.4	12.2	11.4	16.3	6.5	7.0	-	-07
	Corredor EM22	7.7	7.8	46.0	7.4	14.9	-	5.0	32
	C interno EM25	4.6	5.2	39.3	4.8	11.9	-	3.1	33
2º Andar	EM31	13.9	17.6	91.1	19.7	38.2	-	6.3	54
	EM32	19.2	17.7	11.9	18.1	14.8	-	1.6	87
	FEA34	11.7	11.8	12.9	11.8	13.3	-	1.7	85
	FEA36	19.6	17.6	15.5	17.6	15.3	14.7	-	04
	FEA37	14.4	14.4	14.8	14.4	16.3	-	5.9	59
	FEA38	24.9	16.5	8.8	20.0	9.6	7.8	-	11
	Corredor EM32	4.4	6.3	32.2	6.5	11.6	-	2.0	56
	Corredor FEA38	15.1	13.2	6.4	13.7	10.8	-	2.7	58

5.3.2 Resultados qualitativos

Na sequência são apresentados gráficos com ajustes de alguns ambientes *Within Buildings*, seguindo o mesmo critério da seção 5.2.2: um gráfico por prédio avaliado, sendo escolhido, em cada um deles, o ambiente no qual as distribuições μ resultaram na maior diminuição do erro ou aquele em que elas apresentaram o menor valor de erro relativo médio.

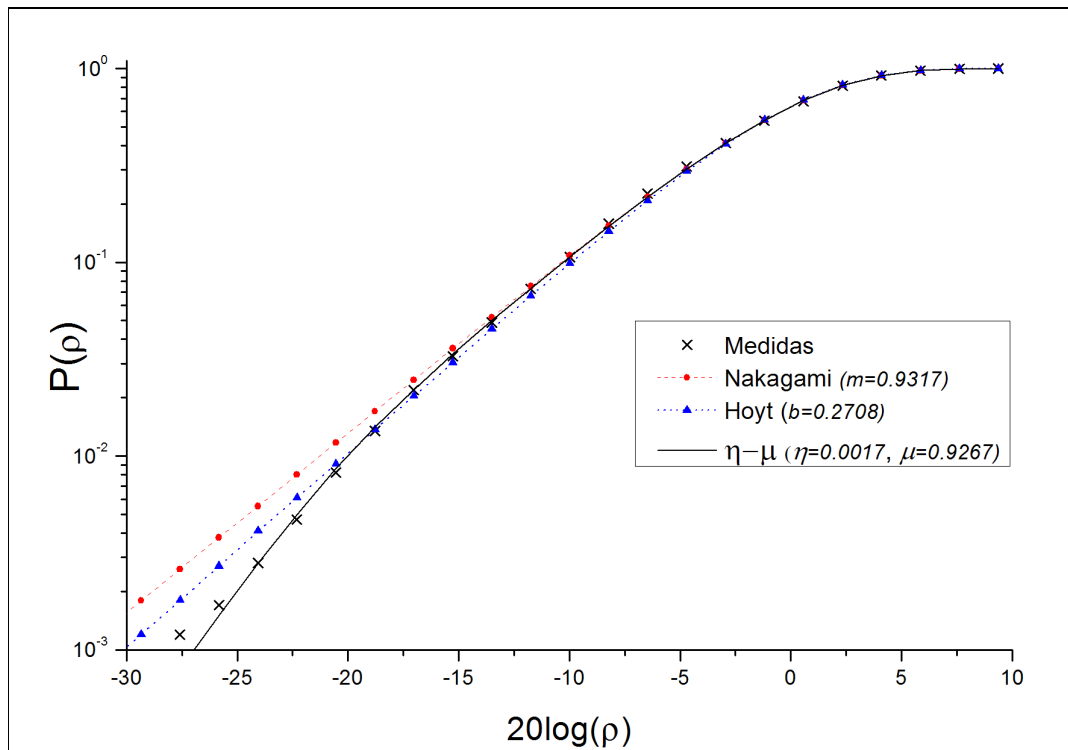


Figura 5.12 – Ajuste FEEC/Bloco F/FE23, medições *Within buildings*.

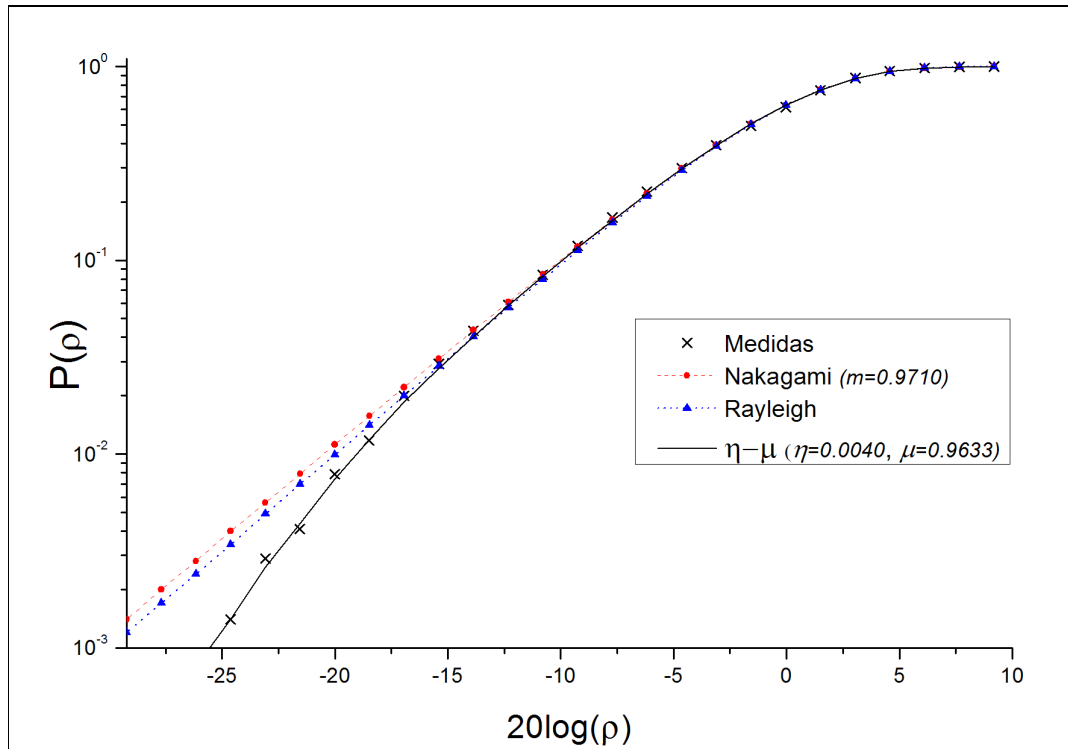


Figura 5.13 – Ajuste FEEC/Pós-graduação/PE32, medições *Within buildings*.

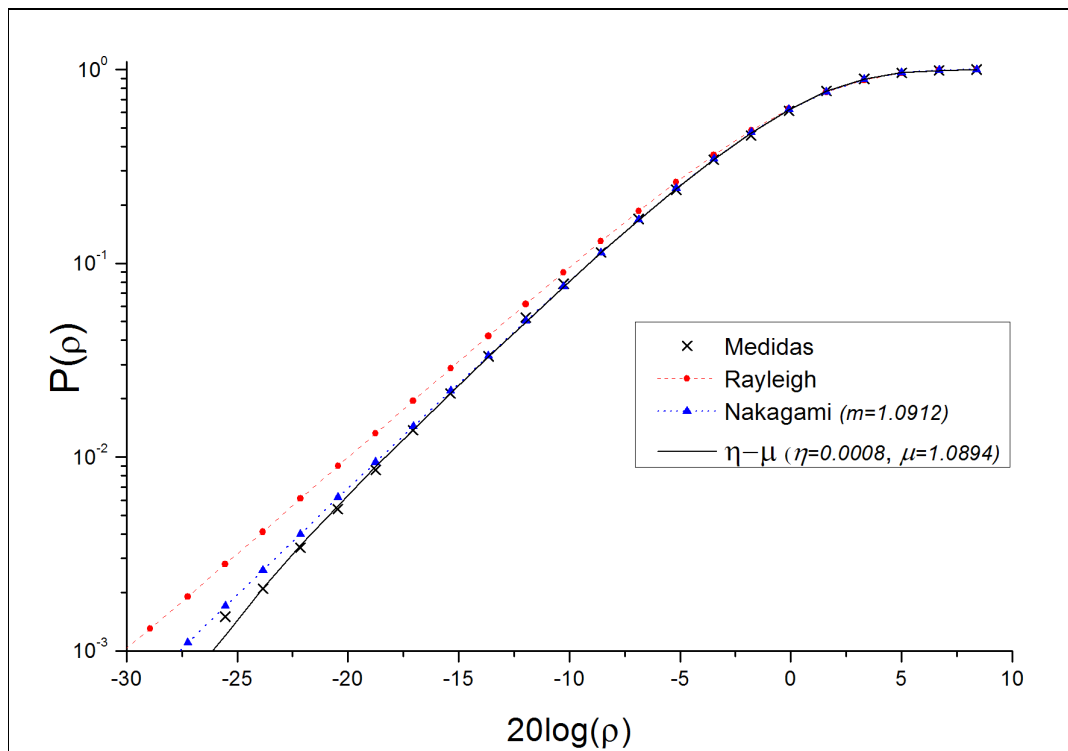


Figura 5.14 – Ajuste FEEC/Oficina, medições *Within buildings*.

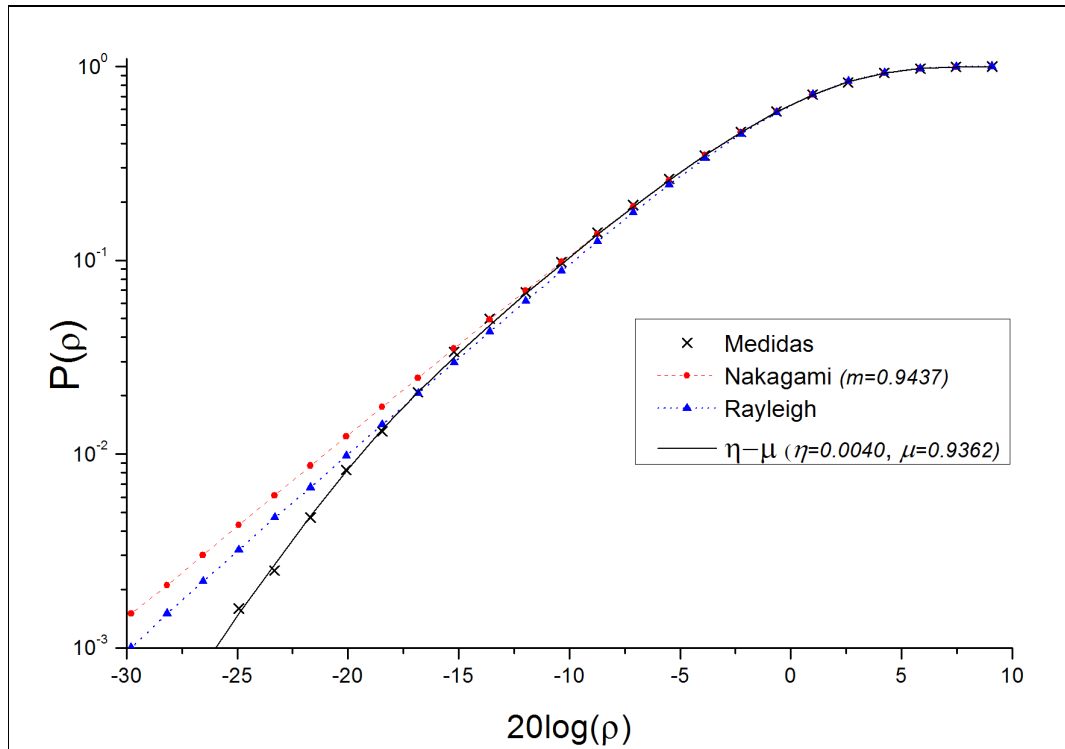


Figura 5.15 – Ajuste FEEC/Bloco G2/Sala 3, medições *Within buildings*.

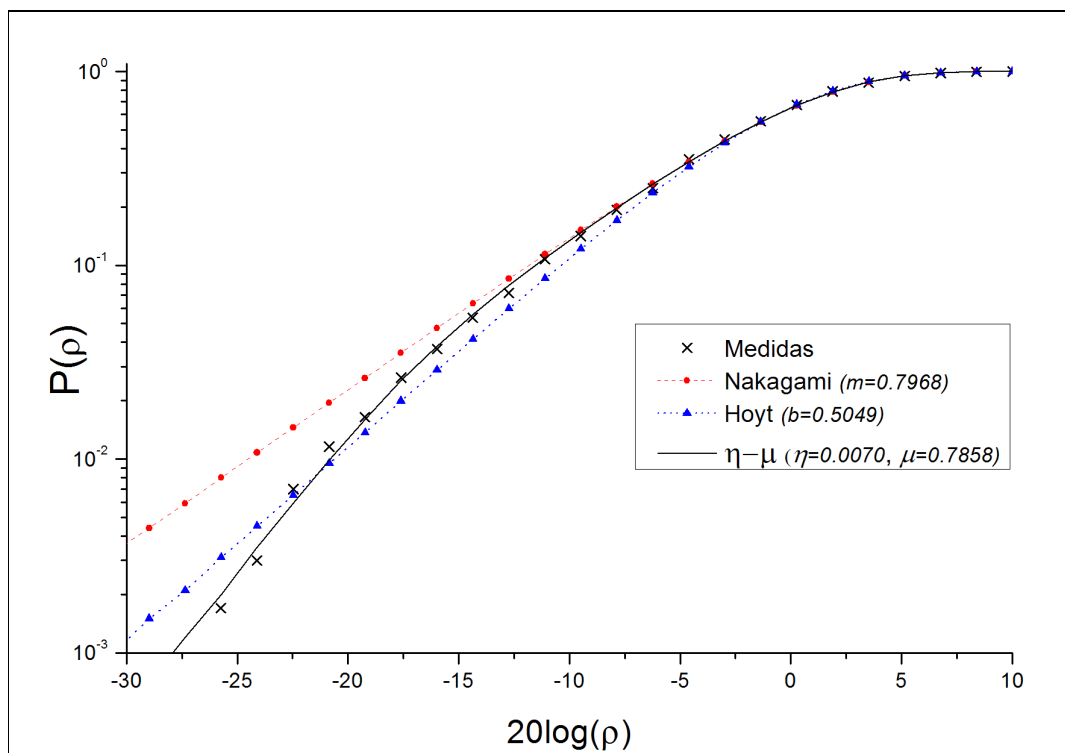


Figura 5.16 – Ajuste FEEC/Demic/Sala 26, medições *Within buildings*.

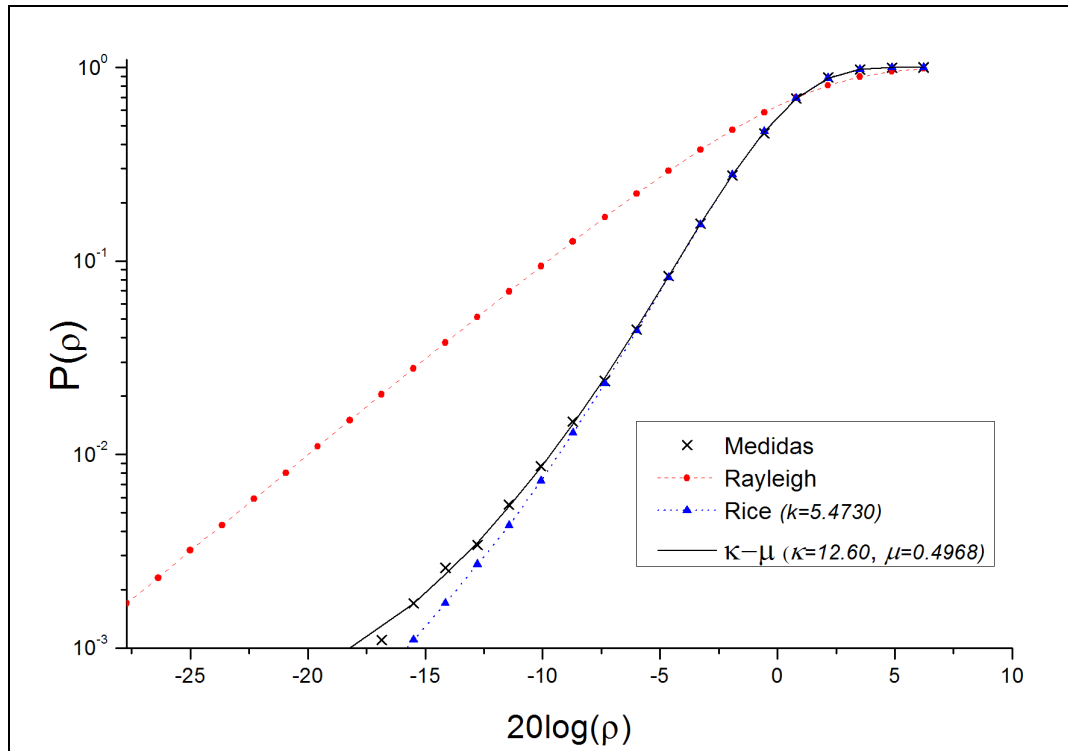


Figura 5.17 – Ajuste Ginásio/ginasiomeio, medições *Within buildings*.

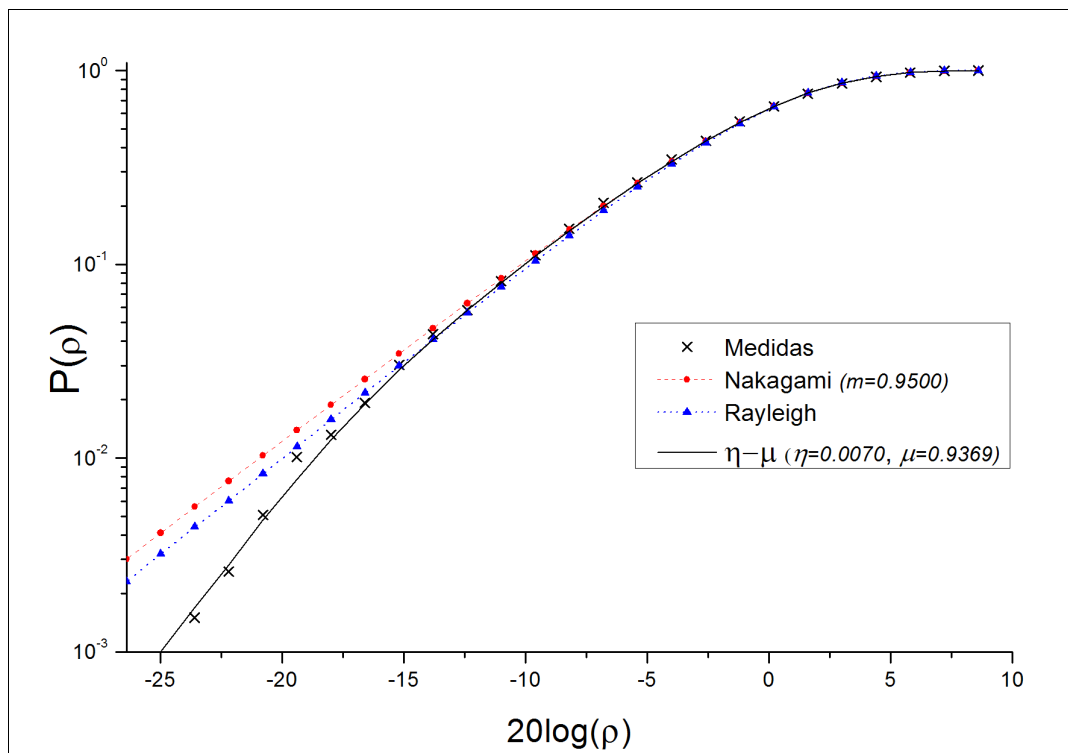


Figura 5.18 – Ajuste Ciclo Básico II/PB13, medições *Within buildings*.

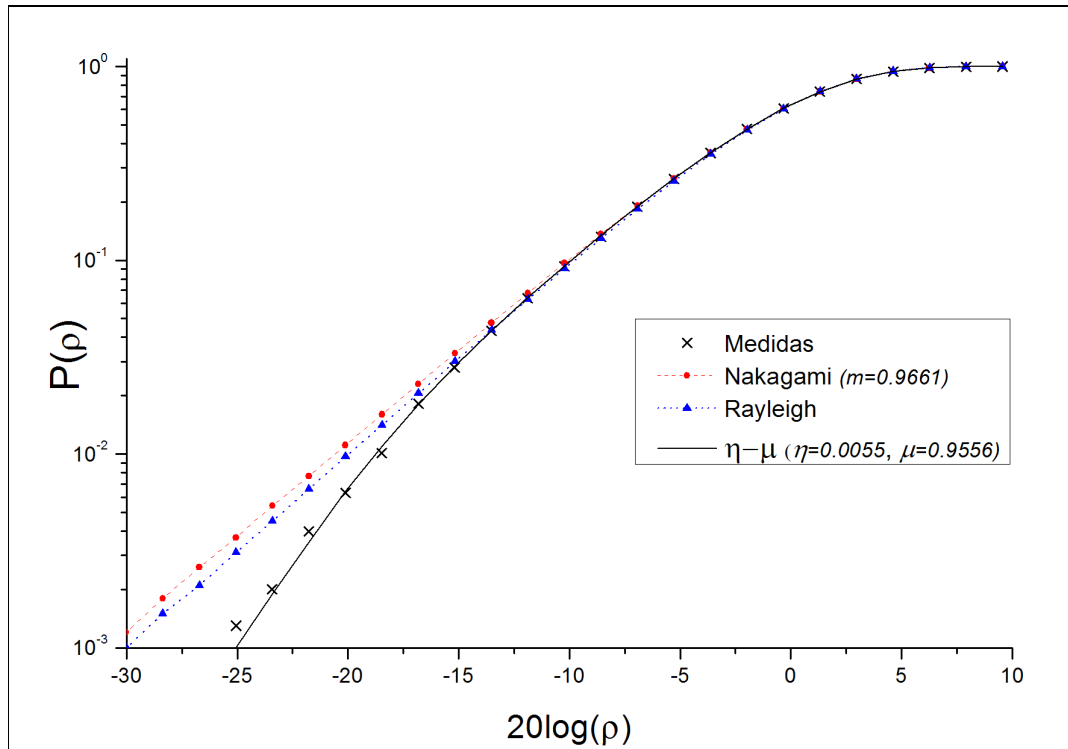


Figura 5.19 – Ajuste FEC/Salas de aula/Corredor lateral (1º andar) , medições *Within buildings*.

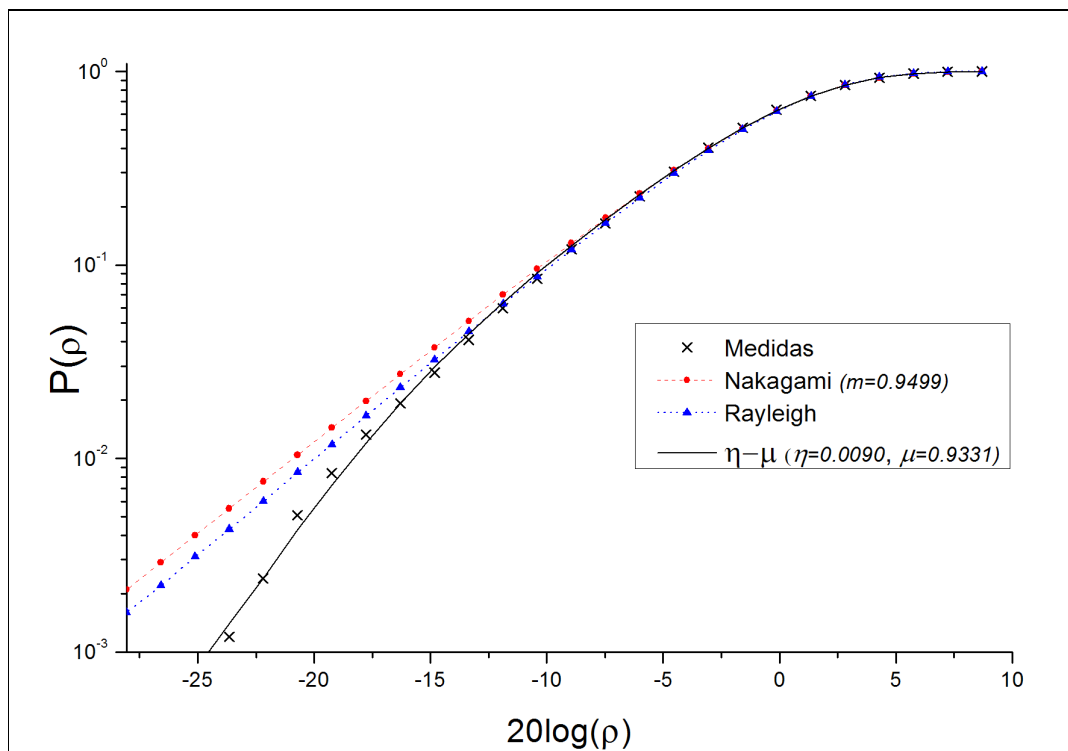


Figura 5.20 – Ajuste FEQ/Bloco C/Corredor labs (1º andar), medições *Within buildings*.

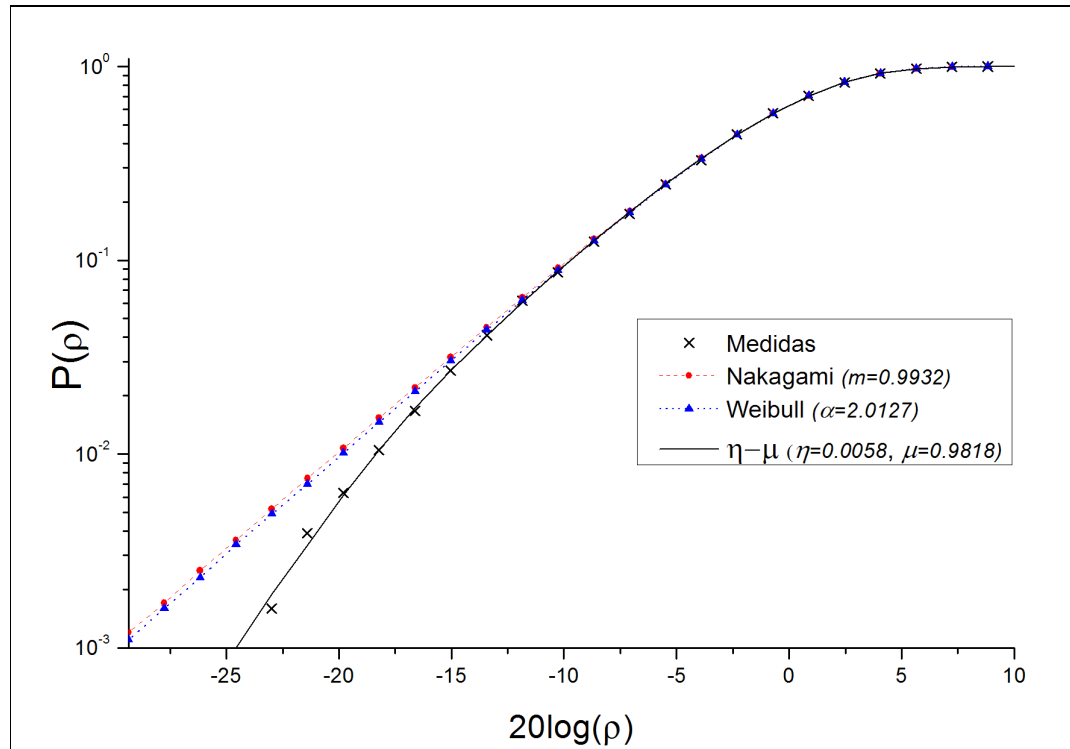


Figura 5.21 – Ajuste FEQ/Bloco D/Lab2, medições *Within buildings*.

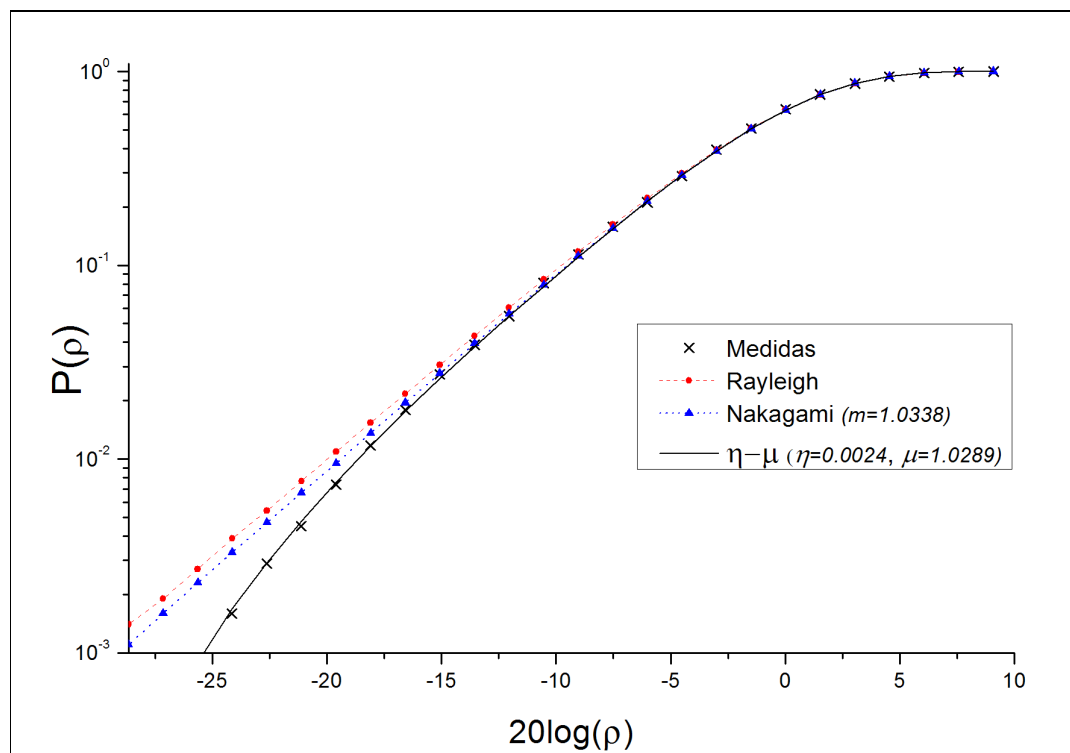


Figura 5.22 – Ajuste FEM/Bloco A/EM32, medições *Within buildings*.

5.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nas seções 5.2 e 5.3, resultados foram apresentados para cada ambiente e cada tipo de medição. Nesta seção, a partir destes resultados particulares, apresentaremos resultados globais, a fim de obter uma análise mais conclusiva da comparação entre as diversas distribuições.

O primeiro resultado a ser apresentado é o das médias gerais dos valores de erro percentual médio para cada uma das distribuições, conforme a tabela 5.23. Cabe-nos observar que a coluna “Melhores ajustes” foi obtida em relação aos valores marcados em negritos nas tabelas 5.1 a 5.22.

Tabela 5.23 – Médias dos erros percentuais médios no total das medições.

Tipo de medida	Rayleigh	Rice	Nakagami	Hoyt	Weibull	Média	Melhores ajustes	Distribuições μ
<i>Into</i>	14.6%	13.2%	23.7%	13.7%	13.7%	15.8%	10.5%	5.0%
<i>Within</i>	26.1%	14.0%	24.1%	21.9%	22.0%	21.6%	9.9%	5.8%
TOTAL	20.4%	13.6%	23.9%	17.8%	17.8%	18.7%	10.2%	5.4%

A análise da tabela anterior mostra que, entre as distribuições tradicionais, a que resultou em um menor erro médio foi a distribuição Rice, seguida, na ordem, pelas distribuições Hoyt, Weibull, Rayleigh e Nakagami. Esta ordem é a mesma para as medições *Into buildings* e difere das medições *Within buildings* apenas pela troca da última posição, de Nakagami para Rayleigh. Ela dá uma primeira idéia do quanto adequado é cada um dos modelos teóricos analisados, bem como o estimador de cada distribuição. O melhor resultado da distribuição Rice neste critério pode ser explicado por alguns motivos. O primeiro é que ela é a única distribuição que considera a existência de linha de visada entre a fonte emissora do sinal e o equipamento receptor. Apesar de não terem sido muitos os ambientes com visada (assim como também não o são na maioria dos sistemas móveis comerciais), eles têm uma considerável influência no valor da média do erro. Nestes ambientes, os ajustes das outras distribuições que não a Rice geralmente apresentam um grande erro, o que acaba comprometendo a média. Como exemplo disso, podemos citar os resultados contidos na tabela 5.17. Outro motivo é que a distribuição Rice tem um estimador eficiente. Com isso, nos casos em que a distribuição Rayleigh é o melhor ajuste entre as distribuições de comparação, a distribuição Rice tem um erro bem próximo. Tal situação já não acontece com a distribuição Nakagami, que frequentemente resulta em ajustes com erro consideravelmente maior do que o

da distribuição Rayleigh, por seu estimador se mostrar menos eficiente nestes casos. Este erro de ajuste é atribuído ao estimador e não ao modelo Nakagami porque, assim como a Rice, a distribuição Nakagami inclui a Rayleigh como caso especial e, não fosse a diferença de precisão dos estimadores, não resultaria em ajustes piores.

Além da média dos erros, outro critério pelo qual as distribuições tradicionais podem ser comparadas é a quantidade de ambientes em que cada uma delas resultou no melhor ajuste entre as cinco. Este critério se diferencia do anterior porque um ajuste ruim não acaba comprometendo todo o resultado. O resultado está apresentado na tabela 5.24.

Tabela 5.24 – Comparação das distribuições tradicionais por quantidade de ambientes com melhor ajuste.

	Rayleigh	Rice	Nakagami	Hoyt	Weibull
<i>Into</i>	34	1	41	23	46
<i>Within</i>	33	10	32	22	51
TOTAL	67	11	73	45	97
%	22.9%	3.8%	25.0%	15.4%	33.2%

A análise da tabela anterior mostra que, entre as distribuições tradicionais, a que resultou em uma maior quantidade de ambientes com melhor ajuste foi a distribuição de Weibull seguida, na ordem, pelas distribuições Nakagami, Rayleigh, Hoyt e Rice. Esta ordem é a mesma para medições *Into buildings* e difere das medições *Within buildings* apenas pela troca de posição entre as distribuições Nakagami e Rayleigh.

Comparando as tabelas 5.23 e 5.24, vemos que existe praticamente uma inversão na ordem das distribuições, o que, de certa forma, não era esperado. Era de se esperar que houvesse uma relação próxima entre o valor da média das distribuições com sua quantidade de melhores ajustes. Mais do que buscar uma explicação ou justificativa para este resultado, podemos fazer constatações a partir dele. A primeira é a de que as distribuições de Nakagami e Weibull possuem estimadores que podem ser considerados mais agressivos no sentido que oscilam entre extremos: se por um lado eles conseguem os melhores ajustes na maior parte dos ambientes, por outro também mais frequentemente resultam em ajustes bem distantes do real. Ou seja, as distribuições Nakagami e Weibull, quando não são os melhores ajustes, quase sempre são os piores. Mais do que isso, algumas vezes elas são muito piores, o que acabou resultando nas piores médias entre as cinco distribuições, mesmo com a maior quantidade de melhores ajustes.

Desta forma, como em cada critério de comparação adotado o resultado obtido foi diferente, percebe-se que não é possível ordenar as distribuições tradicionais, definindo qual

delas ajusta melhor os resultados experimentais. A decisão sobre qual distribuição ser utilizada não é absoluta, mas sim deverá ser tomada dependentemente do objetivo do pesquisador e/ou projetista.

Da tabela 5.24, ainda pode ser feita outra constatação: o aumento do número de ambientes com melhor ajuste pela distribuição Rice nas medições *Within*. Tal resultado já era esperado, já que a presença da fonte emissora em cada um dos prédios aumenta a quantidade de locais com ambiente de visada em relação às medições com o transmissor fixo em um prédio. A distribuição Weibull também mostrou crescimento neste parâmetro. Neste caso, porém, observando a tabela 5.23, podemos inferir que isso não se deveu propriamente a uma melhora dos seus próprios ajustes, mas principalmente ao crescimento do erro das outras distribuições.

Continuando com a comparação entre as medias *Into* e *Within buildings*, voltemos à tabela 5.23. Constatase que, nas medições *Within*, houve um aumento da média do ϵ de todas as distribuições em relação às medições *Into*. Para as distribuições Rice e Nakagami este aumento foi pequeno, mantendo o erro praticamente estável. Contudo, para as outras distribuições – inclusive as distribuições μ – o aumento foi considerável. Uma possível explicação para este resultado é que as menores distâncias entre a transmissão e recepção aumentam as chances de que determinados fenômenos físicos relativos à propagação do sinal sem fio não se manifestem. Por outro lado, com esta menor quantidade de fenômenos, aqueles existentes podem se tornar mais significativos. Desta forma, aquelas distribuições que não considerarem em seu modelo o fenômeno predominante, tendem a apresentar um maior erro. Por outro lado, aquela distribuição que contemplar tal fenômeno, poderá ter um resultado melhor que o das medições *Into buildings*. Prova disso é que, mesmo havendo um aumento da média do erro de todas as distribuições individualmente, quando são considerados apenas os ajustes com menor erro de cada ambiente – intitulados de melhores ajustes – o erro diminuiu.

Abordemos, agora, o principal objetivo deste trabalho, a comparação das distribuições μ com as distribuições tradicionais. Um primeiro resultado importante é saber que diminuição de erro as distribuições μ proporcionam em relação a cada uma das outras distribuições individualmente, bem como em relação à média delas e aos melhores ajustes entre as cinco. Utilizando os resultados apresentados na tabela 5.23, podemos produzir a tabela 5.25.

Tabela 5.25 – Médias das diminuições dos erros no total das medições.

Tipo de medida	Rayleigh	Rice	Nakagami	Hoyt	Weibull	Média	Melhores ajustes
<i>Into</i>	65.6%	62.1%	78.9%	63.4%	63.3%	66.7%	52.1%
<i>Within</i>	77.9%	58.8%	76.0%	73.6%	73.7%	72.2%	41.8%
TOTAL	73.5%	60.4%	77.4%	69.7%	69.7%	70.2%	47.0%

Pode-se observar da tabela 5.25 que a utilização das distribuições μ resulta em uma grande diminuição do erro relativo médio em relação a todas as distribuições tradicionais, totalizando 70.2% em média. Mais do que isso, mesmo em relação aos melhores ajustes de cada ambiente, a diminuição do erro também é grande: 47.0%. Para se ter uma outra idéia do quanto significativa é esta diminuição, podemos fazer uma análise inversa: tomar os valores de erro resultantes dos ajustes das distribuições μ como padrão e calcular agora qual o aumento de erro que seria ocasionado se abdicássemos delas e utilizássemos as distribuições tradicionais. Esses resultados estão contidos na tabela 5.26.

Tabela 5.26 – Médias dos aumentos dos erros relativos médios, no total das medições, tomando os erros das distribuições μ como padrão.

Tipo de medida	Rayleigh	Rice	Nakagami	Hoyt	Weibull	Média	Melhores ajustes
<i>Into</i>	190.7%	163.8%	372.9%	173.4%	172.5%	214.7%	108.6%
<i>Within</i>	352.0%	143.0%	316.6%	278.5%	280.2%	276.8%	71.9%
TOTAL	277.6%	152.6%	342.6%	230.0%	230.5%	246.7%	88.8%

Como pode ser observado, o uso das distribuições tradicionais implica, em média, em um aumento de 246.7% do erro. Mesmo utilizando as distribuições com melhores ajustes para cada um dos ambientes, o projetista que abdicar do uso das distribuições μ terá que lidar com um erro 88.8% maior.

Este é um resultado importante, porém, como já demonstrado anteriormente na comparação entre as distribuições tradicionais, é preciso fazer outras comparações que não apenas as das médias, para que os resultados extremos não levem a conclusões errôneas.

Para se avaliar o quanto as novas considerações dos modelos físicos trazidas com as distribuições μ – e a consequente maior complexidade das expressões matemáticas – realmente propiciam ganhos, é importante saber também em que percentual de ambientes seus ajustes correspondem às condições em que elas não se igualam nem estão muito próximas às distribuições tradicionais. Ou seja, pelo critério aqui já definido, em que percentual de ambientes as distribuições μ propiciam uma diminuição do erro superior a 20%. A resposta a

esta questão está na tabela 5.27. É importante observar que nesta tabela, a fim de possibilitar melhores análises, os ambientes com diminuição de erro menor que 20% foram divididos em duas colunas, uma com a diminuição positiva e outra contabilizando os casos nos quais houve na verdade um aumento do erro.

Tabela 5.27 – Diminuições dos erros percentuais médios no total das medições.

Tipo de Medida	$\Delta\epsilon > 20\%$	$0\% < \Delta\epsilon < 20\%$	$\Delta\epsilon < 0\%$
<i>Into</i>	88	30	17
<i>Within</i>	83	38	26
TOTAL	181	68	43
%	62.0%	23.3%	14.7%

Como pode ser verificado na tabela anterior, na maioria dos ambientes o uso das distribuições μ resulta em uma melhora significativa do erro relativo médio. Em 85% deles houve diminuição do erro e em 62% esta diminuição foi superior a 20%. Considerando-se que as comparações foram feitas com os melhores ajustes das distribuições tradicionais, este resultado pode ser avaliado como muito bom. Mais do que isso, eles se encontram em acordo com os resultados da Tabela 5.25, pois, diferentemente da comparação entre as distribuições tradicionais, neste caso as distribuições μ obtiveram melhores resultados nos dois critérios. Desta forma, e considerando a expressividade de cada um dos resultados, podemos concluir que é inequívoca a vantagem da utilização das distribuições μ em relação às distribuições tradicionais.

Os ótimos resultados das distribuições μ nestes dois critérios de comparação ficam ainda mais significantes quando é feita a análise dos resultados qualitativos. Pelos gráficos obtidos é possível verificar que, além do pequeno erro relativo, as distribuições μ apresentam um comportamento gráfico muito semelhante ao dos dados experimentais. O comportamento mais frequente nas medições realizadas, e que merece destaque, é o dos pontos fazerem uma curva descendente. Tal comportamento é típico do modelo da distribuição η - μ . As vinte e duas figuras apresentadas nas seções 5.2.2 e 5.3.2 – com exceção apenas da Figura 5.17 – são exemplos, em maior ou menor intensidade, deste tipo de curva.

A análise qualitativa também é útil para dirimir possíveis questionamentos sobre a forma de ajuste das distribuições μ . Como explicado na seção 5.1.7, diferentemente das outras distribuições, os parâmetros κ e η não foram calculados por estimadores, mas sim escolhidos por testes gráficos, de forma a resultar no menor erro. Portanto, visto que, como já explicado, além das falhas do modelo físico, a ineficiência dos estimadores também é responsável pelos

erros de ajustes, pode-se questionar se melhores resultados de erro das distribuições μ seriam fruto dessa diferença na determinação dos parâmetros. A resposta é não, por dois motivos. O primeiro é que as distribuições μ não deixam de ser influenciadas por estimadores. O parâmetro μ das duas distribuições é calculado a partir do parâmetro m de Nakagami, que é estimado a partir das medidas coletadas. Essa é uma restrição importante, sobretudo porque o estimador da distribuição Nakagami muitas vezes não funciona bem. Consequentemente, foram observados casos em que a possibilidade de mudança do parâmetro m resultaria em um melhor ajuste para as distribuições μ . Como tal mudança não foi feita, a eventual ineficiência de estimadores também afetou seus ajustes.

O segundo motivo, e o mais importante, advém da análise dos resultados qualitativos. Como já citado, o padrão mais frequente das medições foi uma curva descendente acentuada. Por outro lado, verifica-se que as distribuições tradicionais têm, do início ao fim da cauda, um comportamento praticamente reto, sem flexibilidade. Portanto, mesmo se, igualmente às distribuições μ , os parâmetros das distribuições tradicionais fossem escolhidos por verificação gráfica, os ajustes não seriam adequados. Certamente, haveria diminuição dos erros em alguns ambientes, sobretudo para as distribuições Nakagami e Weibull. Entretanto, como pode ser verificado nos gráficos, essa diminuição não seria suficiente para resultar em erros equiparáveis aos das distribuições μ . Uma prova disso é que, em boa parte dos gráficos, a curva da distribuição η - μ cruza as das distribuições tradicionais (com exceção de Nakagami, pela própria forma de ajuste já citada), comprovando sua maior flexibilidade. Esta característica pode ser vista, por exemplo, nas figuras 5.7, 5.9, 5.12 e 5.16. Outra prova é a existência de ambientes em que todas distribuições tradicionais têm ajustes muito próximos entre si, mas distantes dos pontos experimentais, como visto nas figuras 5.6 e 5.21. Nestes casos, percebe-se que os erros dos ajustes não se deveram a uma ineficiência dos estimadores, mas sim a inadequações dos modelos físicos.

É importante notar que os gráficos das seções 5.2.2 e 5.3.2 se referem apenas aos casos de maior diminuição do erro em cada prédio. Portanto, eles não englobam todos os padrões de comportamento dos pontos, dentre os quais há alguns que ainda merecem ser analisados. Por exemplo, o caso, também usual, em que as distribuições tradicionais resultaram em ajustes bons, como demonstrado na figura 5.23.

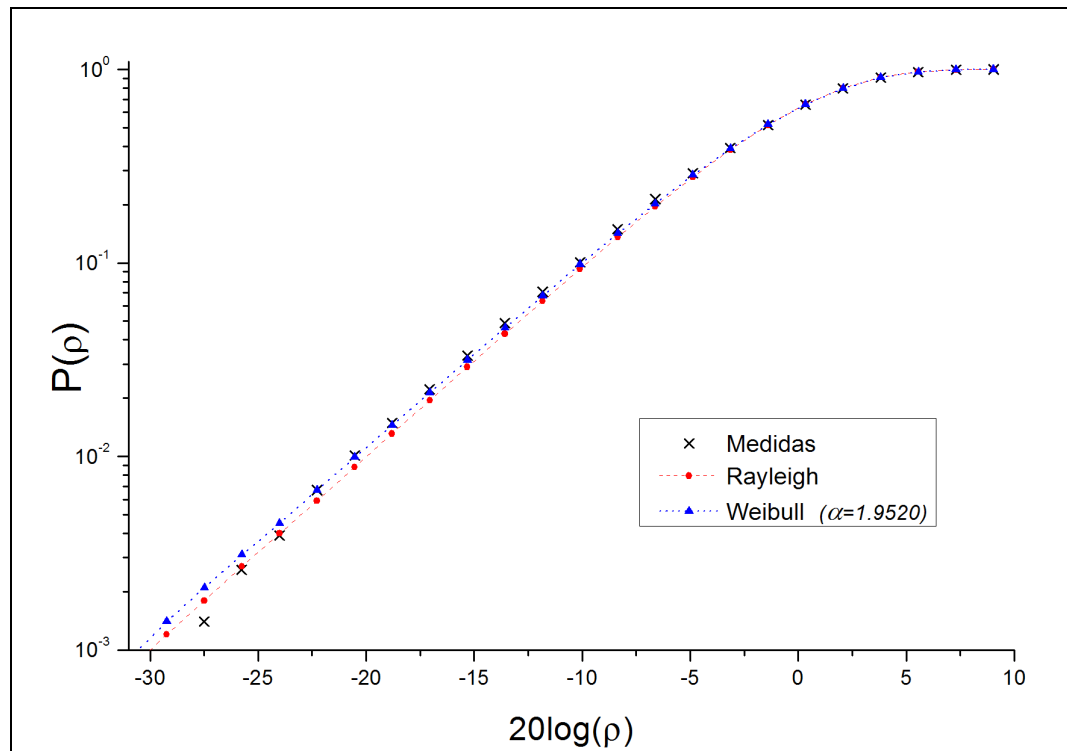


Figura 5.23 – Ajuste adequado das distribuições tradicionais.

A Figura 5.23 é relativa ao ambiente Corredor direito do andar térreo do prédio FEEC–pós-graduação das medições *Into buildings*. Como pode ser verificado na tabela 5.2, todas as distribuições tiveram erro inferior a 7% neste local e, conseqüentemente, resultaram em um ajuste adequado.

Também merece ser mostrada graficamente a situação de as distribuições Nakagami e Weibull variarem entre extremos, resultando em ajustes bem piores ou bem melhores do que as outras distribuições. Observe as figuras 5.24 e 5.25.

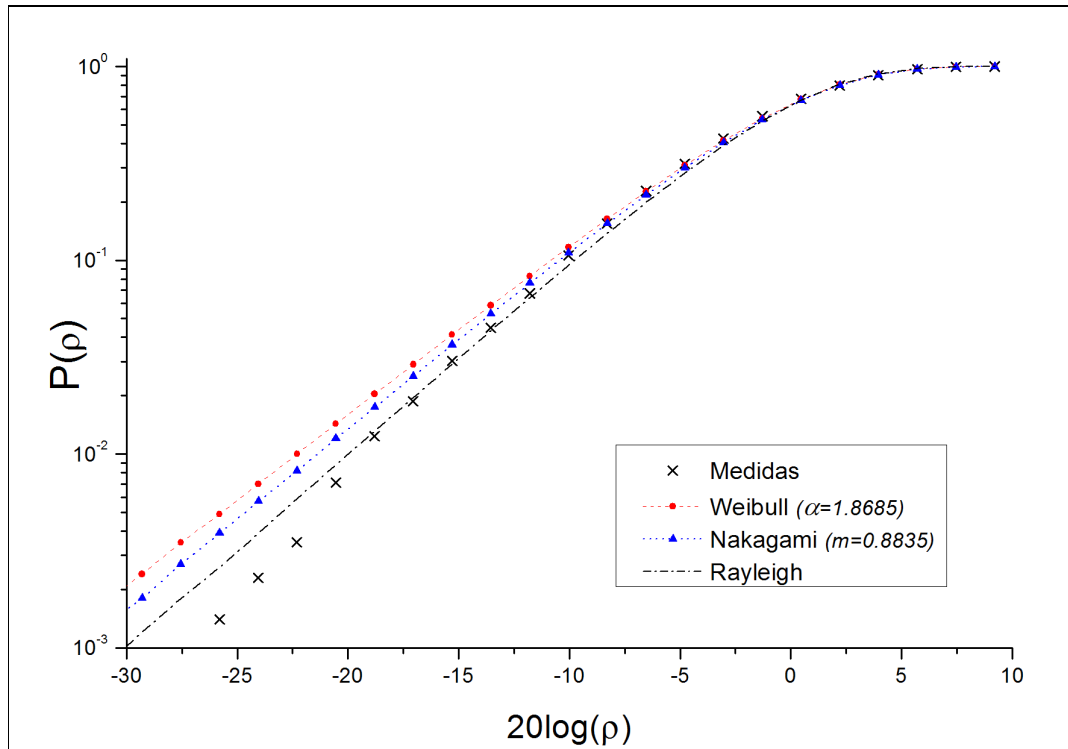


Figura 5.24 – Ajuste ruim das distribuições Nakagami e Weibull.

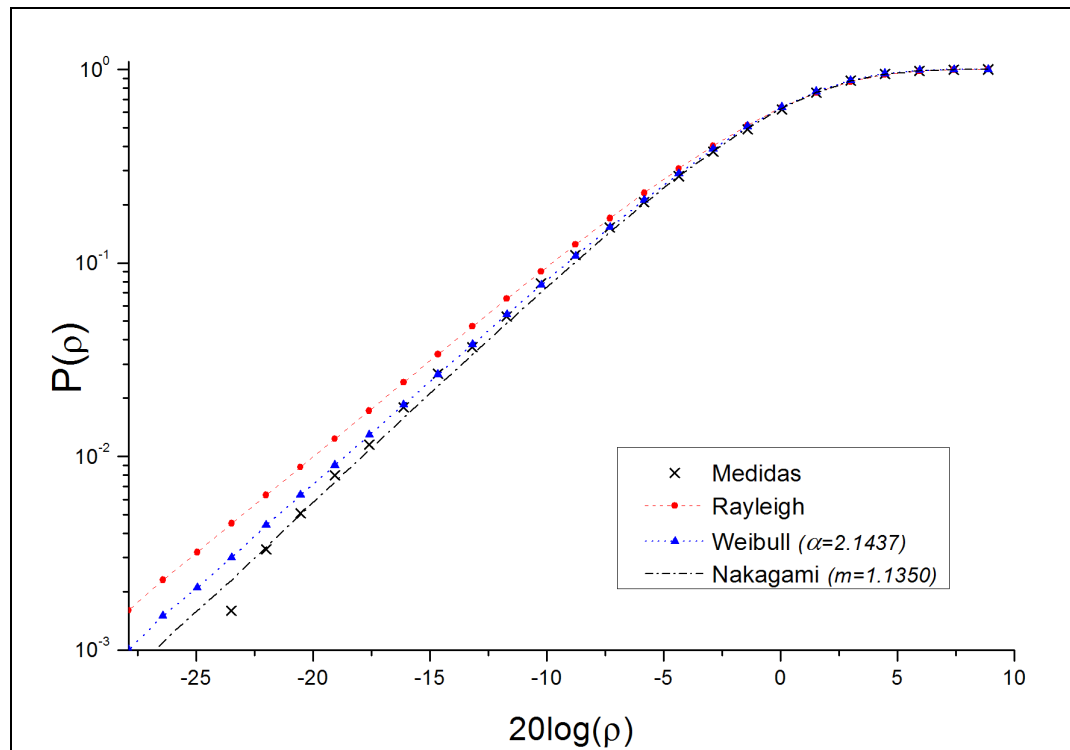


Figura 5.25 – Ajuste melhor das distribuições Nakagami e Weibull.

A Figura 5.24 é relativa à sala FE12 do prédio FEEC-Bloco F, das medições *Into buildings* e a Figura 5.25, à sala CA21 do prédio FEC–Salas de aula, das medições *Within buildings*. Os valores dos respectivos erros podem ser verificados nas tabelas 5.22 e 5.19.

Além destes, há diversos outros padrões que ocorrem com certa frequência. Podem ser encontrados casos em que cada uma das distribuições tradicionais tem destaque sobre as outras quatro. Ou ainda, mais frequentemente, em que duas delas se sobressaem. Demonstrar graficamente todos esses casos é inviável. Porém, a análise das tabelas 5.1 a 5.22 permite a verificação dos diversos padrões.

Uma outra análise pertinente é a da comparação das distribuições μ entre si. Apesar de as distribuições não serem concorrentes, mas sim complementares, é importante saber com que frequência cada uma delas foi utilizada. A tabela seguinte mostra a quantidade de ambientes nos quais as distribuições $\kappa\text{-}\mu$ e $\eta\text{-}\mu$ resultaram no melhor ajuste entre as duas.

Tabela 5.28 – Utilização das distribuições μ por tipo de medida.

Tipo de Medida	Quantidade de ambientes	
	$\kappa\text{-}\mu$	$\eta\text{-}\mu$
<i>Into</i>	33	112
<i>Within</i>	57	90
TOTAL	90	202
%	30.8%	69.2%

Como verificado na tabela anterior, a distribuição $\eta\text{-}\mu$ teve uma utilização bem maior, mais do que o dobro da $\kappa\text{-}\mu$. Tal situação era esperada devido ao próprio modelo físico das distribuições, da consideração da existência ou não de linha de visada com o transmissor. Tanto que, nas medições *Within*, a distribuição $\kappa\text{-}\mu$ resultou em uma quantidade bem maior de ambientes com melhor ajuste em relação às medições *Into*, pois, como já explicado, a presença da fonte emissora em cada um dos prédios aumenta a quantidade de locais com visada. Deve-se observar, porém, que mesmo nas medições *Within* a distribuição $\eta\text{-}\mu$ teve uma quantidade maior de ambientes com melhor ajuste.

Mais do que pela quantidade de ambientes, a distribuição $\eta\text{-}\mu$ teve destaque pelas grandes diminuições de erros proporcionadas por ela. A tabela seguinte mostra a quantidade de ambientes por faixa de diminuição de erro, uma divisão do que já havia sido apresentado na tabela 5.27 para cada uma das distribuições μ .

Tabela 5.29 – Divisão das faixas de diminuições dos erros pelas distribuições μ .

Tipo de Medida	$\Delta\epsilon > 20\%$		$0\% < \Delta\epsilon < 20\%$		$\Delta\epsilon < 0\%$	
	$\kappa\text{-}\mu$	$\eta\text{-}\mu$	$\kappa\text{-}\mu$	$\eta\text{-}\mu$	$\kappa\text{-}\mu$	$\eta\text{-}\mu$
<i>Into</i>	04	94	13	17	16	01
<i>Within</i>	12	71	22	16	23	03
TOTAL	16	165	35	33	39	04
%	5.5%	56.5%	12.0%	11.3%	13.3%	1.4%

Consta-se da tabela 5.29 que, além da quantidade, a proporção de ambientes com maior diminuição do erro é bem superior para a distribuição $\eta\text{-}\mu$. Ela é responsável por mais de 90% dos casos de diminuição significativa do erro ($\Delta\epsilon > 20\%$). No outro extremo, totaliza menos de 10% dos casos de aumento de ϵ . Esse é um resultado bem expressivo e coerente com os resultados qualitativos. Como já informado, dos vinte e dois gráficos de ambientes com maior diminuição de erro para cada prédio, apresentados nas seções 5.2.2 e 5.3.2, apenas um não foi relativo à distribuição $\eta\text{-}\mu$. Isto tudo corrobora para permitir a afirmação de que o modelo da distribuição $\eta\text{-}\mu$ é muito adequado para descrever a variação de pequena escala de um sinal desvanecido.

Esta afirmação não pode ser feita com tanta ênfase para a distribuição $\kappa\text{-}\mu$. Além da menor quantidades de ambientes aplicáveis para seu modelo, em muitos destes casos ela não resultou em um ajuste adequado. Isto pode ser afirmado não apenas pelos valores de erro, mas também pelo próprio comportamento da curva $\kappa\text{-}\mu$ em relação aos pontos experimentais. Diferentemente da distribuição $\eta\text{-}\mu$, a $\kappa\text{-}\mu$ tem um comportamento gráfico na forma de uma cauda convexa. A análise dos resultados experimentais comprova que tal comportamento realmente foi observado nas medições. Exemplos dele podem ser visualizados nas figura 5.17 e 5.26.

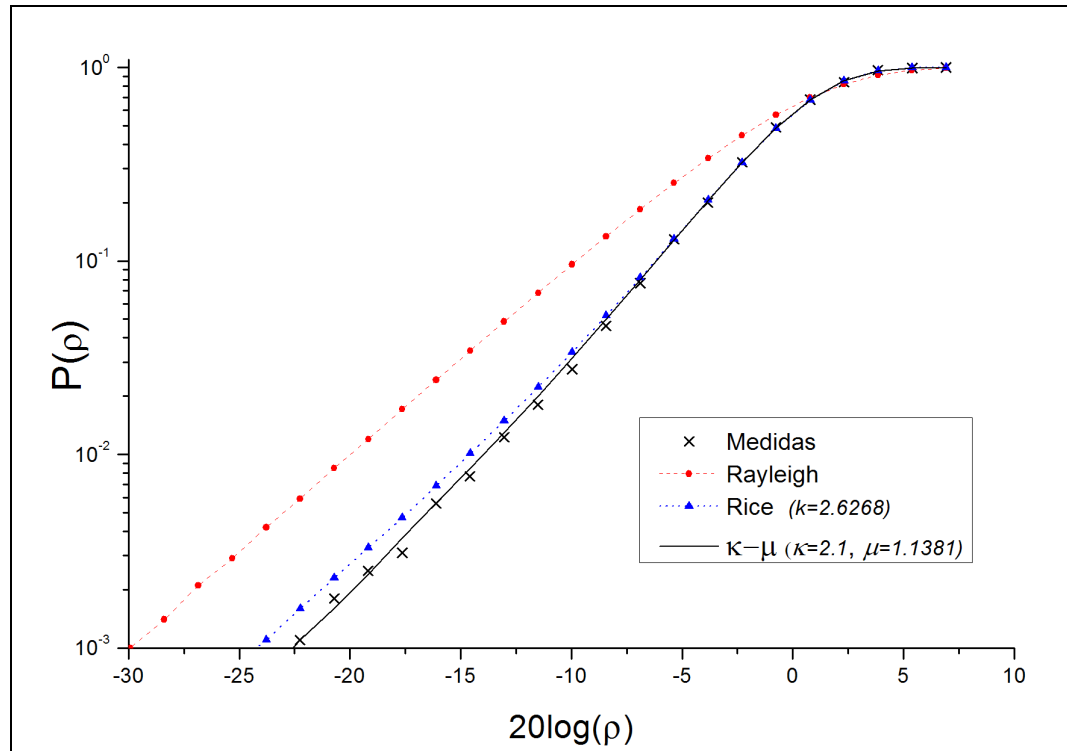


Figura 5.26 – Ambiente de medição com comportamento típico do modelo κ - μ .

A Figura 5.26 é relativa à sala PE29 do prédio FEEC-Pós graduação das medições *Within buildings*.

Apesar de constatado, o comportamento de pontos na forma de uma cauda convexa foi raro. Ele só ocorreu, basicamente, nos ambientes que tiveram, além de linha de visada, uma grande proximidade com o transmissor. Um comportamento mais comum foi o dos pontos, mesmo estando acima da distribuição Nakagami (portanto aplicáveis ao ajuste pela κ - μ), seguirem um padrão de cauda côncava, como exemplificado na figura 5.27.

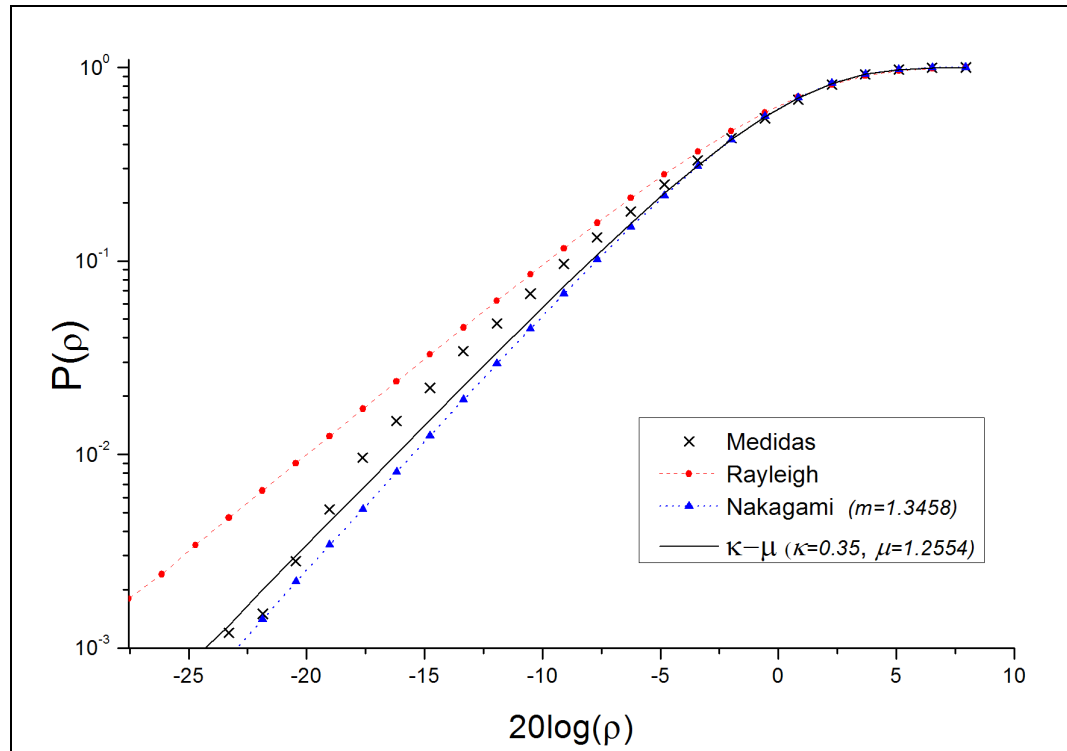


Figura 5.27 – Ambiente com ajuste ruim pela distribuição $\kappa-\mu$.

A Figura 5.27 é relativa ao ambiente Corredor direito do 1º andar do prédio FEEC-Pós graduação das medições *Within buildings*. Nela podemos perceber que o comportamento gráfico da distribuição $\kappa-\mu$ não é igual ao dos pontos. Enquanto sua cauda está subindo, os pontos estão descendo.

Também se pode constatar nesta figura que nenhuma das distribuições proveu um ajuste adequado. Sendo assim, percebemos que, em alguns ambientes, seria necessária a utilização de uma outra distribuição que não as sete incluídas neste trabalho.

A existência de casos como estes já eram esperados. Apesar de prover mais generalização no modelo e maior flexibilidade de ajuste que as distribuições tradicionais, as distribuições $\kappa-\mu$ e $\eta-\mu$ não englobam todos os fenômenos físicos possíveis (assim como nenhuma outra distribuição), inclusive alguns já constatados experimentalmente, como o da não linearidade do meio, contemplado na distribuição Weibull. Portanto, assim como nas comparações anteriores, mais do que constatar a existência desses casos, é necessário mensurar com que frequência eles ocorrem. Ou seja, é necessário determinar experimentalmente em que percentual de ambientes são realmente necessárias novas distribuições e quanto de melhora elas ainda podem proporcionar.

Para tanto, recorreremos novamente às análises gráficas. O objetivo agora foi definir um valor de erro que possa ser considerado pequeno, abaixo do qual constata-se a existência de grande similaridade entre os ajustes experimental e teórico. A observação dos gráficos nos permitiu concluir que tal valor é 10%. Portanto, serão considerados adequados os ajustes que resultarem em um ε inferior a 10%. A frequência destes casos para as diversas distribuições foi a seguinte:

Tabela 5.30 – Quantidade de ambientes com $\varepsilon < 10\%$.

Tipo de medida	Rayleigh	Rice	Nakagami	Hoyt	Weibull	Média	Melhores ajustes	Distribuições μ
<i>Into</i>	49	59	39	55	63	53	91	138
<i>Within</i>	33	46	29	41	61	42	90	136
TOTAL	82	105	68	96	124	95	181	274
%	28.1%	36.0%	23.3%	32.9%	42.5%	32.5%	62.0%	93.8%

Como mostrado na tabela 5.30, as distribuições tradicionais totalizaram, em média, 32.5% dos seus ajustes com erro inferior a 10%. Considerando-se apenas os melhores ajustes, este valor sobe para 62.0%. Já para as distribuições μ tal percentual tem uma grande melhora, chegando a 93.8%.

Antes de tudo, este é mais um resultado que demonstra a grande melhora proporcionada pela utilização das distribuições μ . Pelo padrão adotado, em apenas 6.2% dos ambientes seus ajustes são considerados inadequados.

Portanto, a respeito de novas distribuições, vemos que foi pequeno o percentual de ambientes em que elas são necessárias. Também podemos afirmar que a magnitude de melhora possível não é muito grande. Em apenas dois dos 292 ambientes o erro dos ajustes da distribuição κ - μ ou η - μ foi superior a 20%, e o maior deles foi 22%, que não é um erro muito grande.

Mesmo não sendo muito significativas, não se pode, por outro lado, desconsiderar as possíveis vantagens de novas distribuições. Além dos casos observados em que o ajuste não foi adequado por nenhuma das distribuições, mesmo nos casos de ajustes bons novas distribuições podem proporcionar uma melhora. O que certamente acontecerá, contudo, é que esta melhora não terá a mesma magnitude da que foi aqui apresentada pelas distribuições κ - μ ou η - μ em relação às tradicionais. Em suma, podemos considerar que novas distribuições podem vir a prover um “ajuste fino” do que já está bem adequado.

5.5 CONCLUSÕES

Neste capítulo foram apresentados resultados de comparação, quanto ao ajuste de dados experimentais, das distribuições κ - μ e η - μ com as distribuições tradicionais e destas distribuições tradicionais entre si.

Primeiramente, foi feita uma comparação quantitativa. Para tanto, foi necessário definir duas grandezas: o erro percentual médio (ϵ) e a variação ou diminuição do erro ($\Delta\epsilon$). Foram apresentados 1752 valores de ϵ , relativos aos ajustes de seis distribuições para os 292 ambientes analisados e as respectivas diminuições dos erros em cada um deles, proporcionadas pelas distribuições μ . Estes valores, apresentados em 22 tabelas, permitiram que fossem geradas várias estatísticas para comparar as distribuições, que deram origem a mais oito tabelas.

Entre as distribuições tradicionais, houve destaque para a distribuição Rice, quando considerada a média dos erros, e para a distribuição Weibull, quando o parâmetro de comparação foi a quantidade de ambientes com melhor ajuste.

Foi demonstrado que as distribuições μ proporcionaram uma diminuição média de 70.2% nos erros dos ajustes das distribuições tradicionais. Mesmo em relação aos melhores ajustes delas, essa diminuição foi grande, resultando em 47.0%. Considerando os erros das distribuições μ como padrão, essas diminuições correspondem a aumentos dos erros iguais a 246.7% e 88.8%, respectivamente.

Também foi constatado que o uso das distribuições μ resulta em uma diminuição significativa do erro ($\Delta\epsilon > 20\%$) na maioria dos locais, mais especificamente em 62% dos ambientes analisados.

A análise qualitativa foi congruente com a quantitativa. Foi mostrado que na maioria dos ambientes o comportamento dos pontos foi semelhante ao das distribuições μ , geralmente uma curva descendente acentuada, com cauda côncava, típica do ajuste da distribuição η - μ . Além da semelhança gráfica, a distribuição η - μ teve destaque particular pelas alta quantidade e alta proporção de bons ajustes. Ela foi aplicável em mais do que o dobro dos ambientes em relação à κ - μ , 202 contra 90. Mais importante, foi responsável por mais de 90% dos casos de diminuição significativa do erro.

Também foi constatada a existência de alguns ambientes nos quais nenhuma das distribuições gerou um ajuste adequado, o que suscitou a necessidade de outras distribuições que não as sete analisadas nesta dissertação. Estes ambientes, porém, corresponderam a

apenas 6.2% dos casos. Isto nos permitiu concluir que, se novas distribuições podem proporcionar uma melhora nos ajustes dos pontos experimentais, esta certamente não terá mesma magnitude da que foi aqui apresentada pelas distribuições κ - μ ou η - μ em relação às distribuições tradicionais.

CAPÍTULO 6

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi realizada uma ampla comparação, por meio da obtenção e análise de dados experimentais, de diversos modelos da variação de pequena escala de um sinal de desvanecimento. Foram incluídos todos os modelos tradicionais que possuem alguma expressão na literatura – Rayleigh, Rice, Nakagami, Hoyt e Weibull – bem como dois propostos mais recentemente, os modelos κ - μ e η - μ .

Por ter sido produzido um grande espaço amostral, de um tamanho sem precedentes na literatura específica sobre o assunto, os resultados apresentados permitiram que fosse mensurada a frequência de ocorrência de determinados padrões de desempenho, como o percentual de ambientes nos quais o erro de cada distribuição é aceitável e o percentual em que os modelos κ - μ e η - μ resultam em um erro significativamente melhor do que os melhores ajustes das distribuições tradicionais.

Este enfoque de frequência de ocorrência foi importante para poder avaliar a justificativa da utilização prática das distribuições μ . Por terem expressões bem mais complexas, é importante saber o quanto e com que frequência seus ajustes resultam em uma melhora significativa em relação aos modelos tradicionais.

Pelos resultados obtidos – uma diminuição de 70% em média e de 47% em relação aos melhores ajustes das distribuições tradicionais, bem como um total de 62% dos ambientes com diminuição significativa do erro – este autor concluiu que a utilização das distribuições μ é não apenas importante, mas essencial para modelagem dos novos sistemas móveis de comunicação.

De qualquer forma, foram apresentados todos os resultados obtidos – não apenas qualitativos, mas também valores quantitativos precisos – permitindo que outros pesquisadores obtenham suas próprias conclusões.

Deve-se ressaltar também que os resultados obtidos permitiram não apenas comparar as distribuições entre si, mas ainda avaliar individualmente o desempenho de cada uma delas em uma profundidade ímpar.

Apesar de os resultados aqui apresentados já terem sido parcialmente publicados em periódicos e anais (vide seção Trabalhos Publicados pelo Autor), a maior parte deles estão sendo divulgados pela primeira vez nesta dissertação. Portanto, espera-se que ainda sejam publicados diversos outros artigos baseados neste trabalho.

6.1 Investigações futuras

Este trabalho, como toda pesquisa, é parte de um processo inacabado. Em se tratando da validação de distribuições generalizadas de desvanecimento, vislumbram-se os seguintes tópicos como objetos potenciais de futuros trabalhos:

Comparação das Estatísticas de Ordem Superior: devido à grandeza do espaço amostral aqui utilizado, as distribuições de desvanecimento foram comparadas somente por suas estatísticas de primeira ordem (função distribuição cumulativa). Deve ser objeto de investigação posterior a comparação das suas estatísticas de segunda ordem, como a taxa de cruzamento de nível e a duração média de desvanecimento.

Medições em Outras Frequências: também é importante comparar o desempenho das distribuições de desvanecimento em outras frequências, especialmente naquelas em que operam os diversos sistemas móveis comerciais: 2.4 GHz, 3.5 GHz, 5.8 GHz, etc. Estas comparações devem investigar a extensão das diferenças dos resultados e tentar avaliar a necessidade de se fazerem novos experimentos para cada uma das frequências que vierem a ser usadas pelos novos sistemas que forem surgindo.

Inclusão de Outras Distribuições: as análises e comparações aqui realizadas podem ser estendidas para outras distribuições de desvanecimento, propostas mais recentemente. São elas: α - μ [31], λ - μ [50], η - κ simétrica [49], η - κ assimétrica [51], α - κ - μ [52], α - η - μ [52] e α - η - κ - μ [53].

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] GSM Association. **Brief History of GSM & the GSMA**. Disponível em: <<http://www.gsmworld.com/about/history.shtml>>. Acesso em: Setembro de 2008.
- [2] NAKAGAMI, M. **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.
- [3] STEIN, S. **Fading channel issues in system engineering**. *IEEE J. Selected Areas in Commun.*, vol. 5, no. 2, pp. 68-69, Fevereiro de 1987.
- [4] YACOUN, M. D. **The η - μ Distribution: A General Fading Distribution**. *IEEE Boston Fall Vehicular Technology Conference 2000*, Boston, USA, Setembro de 2000.
- [5] YACOUN, M. D. **The κ - μ Distribution: A General Fading Distribution**. *IEEE Atlantic City Fall Vehicular Technology Conference 2001*, Atlantic City, USA, Outubro de 2001.
- [6] MARTINS, F. C.; TERCIUS, H. B.; e YACOUN, M. D. **Validating The κ - μ Distribution and The η - μ Distribution**. *International Workshop on Telecommunications, IWT 2004*, Santa Rita do Sapucaí, MG, Brasil, Agosto de 2004.
- [7] MARTINS, F. C.; TERCIUS, H. B.; YACOUN, M. D. **Medidas de banda estreita em 1800MHz e as distribuições gerais de desvanecimento κ - μ e η - μ** . *XXI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, SBrT'04*, Belém, PA, Setembro de 2004.
- [8] JAKES, W. C. *Microwave Mobile Communications*. New York: Wiley, 1974.
- [9] RAPPAPORT, T. S. *Wireless Communications - Principles and Practice*. New Jersey, IEEE Press/Prentice-Hall, 1996.
- [10] TERCIUS, H. B.; YACOUN, M. D.; CROCOMO, L. F.; KRETLY, L. C.; MARTINS, F. C.; TOLEDO, A. F. **EADMEC - Equipamento de Aquisição de Dados Modular Especialmente Controlado**. *Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia, COBENGE 2003*, Rio de Janeiro, RJ, Setembro de 2003.
- [11] HOPPE, R.; WÖLFLE, G.; LANDSTORFER, F. M. **Measurements of Building Penetration Loss and Propagation Models for Radio Transmission Into Buildings**. *IEEE Vehicular Technology Conference, VTC 1999*, Setembro de 1999.
- [12] VALENZUELA, R. A.; LANDRON, O.; JACOBS, D. L. **Estimating Local Mean Signal Strength of Indoor Multipath Propagation**. *IEEE Transactions On Vehicular Technology*, Vol. 47, NO. 1, Fevereiro de 1997.
- [13] MOCKFORD, S.; TURKMANI, A. **Penetration Loss Into Buildings at 900 MHz**. *IEE Colloquim on Propagation Factors and Interference Modelling for Mobile Radio Systems*, Novembro de 1988.

- [14] GANESH, R.; PAHLAVAN, K. **Statistics of Short Time variations of Indoor Radio Propagation.** *ICC*, 1991.
- [15] ZHOU, Q.; LAI, A. K. Y. **The Dependence of Single Room Indoor Radio Propagation on Frequency.** *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, 1996.
- [16] ABDI, A.; WILLS, K.; BARGER, H. A.; ALOUINI, M.; KAVEH, M. **Comparison of the Level Crossing Rate and Average Fade Duration of Rayleigh, Rice, and Nakagami Fading Models with Mobile Channel Data.** *IEEE Vehicular Technology Conference, VTC 2000*, vol. 4, pp 1850-1857, Setembro de 2000.
- [17] TZEREMES, G.; CHRISTODOULOU, C. G. **Use of Weibull Distribution for Describing Outdoor Multipath Fading.** *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, 2002.
- [18] SIQUEIRA, G. L.; RAMOS, G. L.; VIEIRA, R. D. **Propagation Measurements of a 3.5 GHz Signal: Path-Loss and Variability Studies.** *SBMO/IEEE International Microwave and Optoelectronics Conference*, IMOC 2001, Belém, PA, Brasil, Agosto de 2001.
- [19] KIM, D.; INGRAM, M. A.; SMITH, W. W. J. **Measurements of Small-Scale Fading and Path Loss for Long Range RF Tags.** *IEEE Transactions On Antennas and Propagation*, Vol. 51, NO. 8, Agosto de 2003.
- [20] TOLEDO, A. F. **Narrowband characterization of radio transmission into and within buildings at 900, 1800 and 2300 MHz.** *Ph. D. thesis*, Dept. Elec. Eng. and Electr., University of Liverpool, U. K., Maio de 1992.
- [21] LORD RAYLEIGH, J. W. S. *Phil. Mag.*, 73(10), 1880.
- [22] PAWSEY, J. L. *Proc. Camb. Phil. Soc.*, 31(125), 1935.
- [23] RICE, S. O. **Mathematical analysis of random noise.** *Bell System Technical Journal*, 23:282–332, Julho de 1944.
- [24] YACOUB, M. D. **Fading distributions and co-channel interference in wireless systems.** *IEEE Antennas and Propagations Magazine*, Vol.42, No. 1, pag. 150-159, Fevereiro de 2000.
- [25] SUZUKI, H. **A statistical model for urban radio propagation.** *IEEE Trans. Commun.*, 25(7): 673–679, Julho de 1977.
- [26] HOYT, R. S. **Probability Functions for the Modulus and Angle of the Normal Complex Variate.** *Bell System Technical Journal*, 26:318–359, Abril de 1947.
- [27] FISHER, R.A.; TIPPET, L.H.C. **Limiting forms of the frequency distribution of the largest or smallest member of a sample.** *Em Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, pag. 180–190, 1928.

- [28] WEIBULL, W. **A statistical theory of the strength of materials.** *Royal Swedish Institute for Engineering Research*, (151), 1939.
- [29] SHEPHERD, N. H. **Radio wave loss deviation and shadow loss at 900 MHz.** *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 26:306–313, Nov. 1977.
- [30] YACOUB, M. D. **The α - μ distribution: a general fading distribution.** Em Proc. *IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Communications, PIMRC 2002*, vol. 2, pp. 629–633, Setembro de 2002.
- [31] YACOUB, M. D. **The α - μ distribution: a physical fading model for the Stacy distribution.** *IEEE Transactions on Vehicular Technologies*, vol. 56, no. 1, Janeiro de 2007.
- [32] BRAUN, W. R.; DERSCH, U. **A physical mobile radio channel model.** *IEEE Transactions on Vehicular Technologies*, 40(2):472-482, Maio de 1991.
- [33] HOWARD, S. J.; PAHLAVAN, K. **Fading results from narrowband measurements of the indoor radio channel.** *IEEE Int. Symp. Personal, Indoor, and Mobile Radio Commun., PIRMC 1991*, Londres, Inglaterra, Setembro de 1991.
- [34] DIAS, U. S.; YACOUB, M. D.; FRAIDENRAICH, G.; COSTA, D. B.; FILHO, J. C. S. **On the Weibull Autocorrelation and Power Spectrum Functions: Field Trials and Validation.** *IEEE Communications Letters*, vol. 10, no.10, Outubro de 2006.
- [35] HOWARD, S. J. **Fading Results From Narrowband Measurements of the Indoor Radio Channel.** *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Setembro de 1991.
- [36] YACOUB, M. D. **The κ - μ Distribution and the η - μ Distribution.** *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 49, no. 1, pp. 68-81, Fevereiro de 2007.
- [37] ASPLUND, H.; MOLISCH, A. F.; STEINBAUER, M.; MEHTA, N. B. **Clustering of scatterers in mobile radio channels – Evaluation and modeling in the COST259 Directional Channel Model.** *IEEE International Conference on Communications, ICC 2002*, Nova York, EUA, Abril-Maio de 2002.
- [38] YACOUB, M. D. **Foundations of Mobile Radio Engineering.** CRC Press, 1993.
- [39] JAKES, W. C. **Microwave mobile communications.** John Wiley & Sons, 1974.
- [40] HORIKOSHI, J. *et al.* **1.2 GHz band wave propagation measurements in concrete building for indoor radio communications.** *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 35, no. 4, pp. 146-152, Novembro de 1986.
- [41] UREI, A. **Erros in Estimating Local Average Power of Multipath Signals.** *IEE Eletronic Letters*, vol. 27, no. 4, pp. 315-317, Fevereiro de 1991.
- [42] LEE, W. C. Y. **Estimate of Local Power of a Móbile Radio Signal.** *IEEE Transactions on Veicular Technology*, vol. VT-34, no. 1, Fevereiro de 1985.

- [43] SIQUEIRA, G. L.; VÁSQUEZ, E. J. A. **Local and Global Signal Variability Statistics in a Mobile Urban Enviroment.** *Wireless Personal Communications* 15: 61-78, 2000.
- [44] COULSON, A. J.; WILLIAMSON, A. G.; VAUGHAN, R. G. **Improved Fading Distribution for Mobile Radio.** *IEE Proc. Commun.*, Vol. 145, No. 3, Junho de 1998.
- [45] BELLO, J. C. R. D.; SIQUEIRA, G. L.; BERTONI, H. L. **Theoretical Analysis and Measurement Results of Vegetation Effects on Path Loss for Mobile Cellular Communication Systems.** *IEEE Transactions On Vehicular Technology*, vol. 49, no. 4, Julho de 2000.
- [46] RUBIO, L.; CARDONA, N.; FLORES, S.; REIG, J.; JUAN-LLÁCER, L. **The Use of Semi-deterministic Propagation Models for the Prediction of the Short-term Fading Statistics in Mobile Channels.** *IEEE Vehicular Technology Conference, VTC 1999*, Setembro de 1999.
- [47] PAPADAKIS, N.; KANATAS, A. G.; MORAITIS, N.; CONSTATINOU, P. **Indoor Mobile Radio Channel Measurements and Characterization for DECT Picocells.** *IEEE Symposium on Computers and Communications, ISCC 1998*, Julho de 1998.
- [48] HASHEMI, H. **A study of Temporal and Spatial Variations of the Indoor Radio Propagation Channel.** *IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Communications, PIMRC 1994*, Setembro de 2004.
- [49] YACOU, M. D.; FRAIDENRAICH, G.; TERCIUS, H. B.; MARTINS, F. C. **The Symmetrical η - κ Distribution: A General Fading Distribution.** *IEEE Transactions On Broadcasting*, vol. 51, no. 4, Dezembro de 2005.
- [50] FRAIDENRAICH, G.; YACOU, M. D. **The λ - μ general fading distribution.** *SBMO/IEEE International Microwave and Optoelectronics Conference, IMOC 2003*, Foz do Iguaçu, Brasil, Setembro de 2003.
- [51] YACOU, M. D.; FRAIDENRAICH, G.; TERCIUS, H. B.; MARTINS, F. C. **The Asymmetrical η - κ Distribution.** *SBrT/IEEE Journal of Communication and Information Systems*, vol. 20, no. 3, pp. 182-187, Dezembro de 2005.
- [52] FRAIDENRAICH, G.; YACOU, M. D. **The α - η - μ and α - κ - μ Fading Distributions.** *IEEE International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications, ISSSTA 2006*, Manaus, Brasil, Agosto de 2006.
- [53] FRAIDENRAICH, G. **Distribuições e Estatísticas de Ordem Superior para o Canal Sem Fio.** Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, Fevereiro de 2006.

APÊNDICE A

ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS

Este apêndice fornece as informações de marca, modelo e especificações técnicas dos componentes utilizados na montagem do EADMEC. O equipamento foi projetado para operar na frequência de operação de 1800 MHz.

- **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 EADMEC 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 4.1.
- **Antena:** Kathrein, modelo No. K704784. Faixa de frequência de operação 1710 – 1880 MHz. Conexão cabo RG 174.
- **Atenuador:** Agilent, modelo 8496A. Atenuador manual para frequências de 0 a 4 GHz com atenuação variável de 0 a 110dB, em passos de 10dB.
- **Amplificador:** Mini-circuits, modelo ZHL-1724HLN-case NN92. Frequência de operação de 1700 a 2400 MHz. Amplificação de 40dB e alimentação na faixa de 12 a 16 VDC.
- **Analizador de espectro:** HP, modelo 8593E, com frequência de operação de 0 a 22 GHz.

- **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 20 Gb. Placa fax/modem de 56k. Placa de rede 10/100 e DVD. 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 número 011AO63D1, 12V, 63Ah.