

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**  
**CENTRO TECNOLÓGICO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**MODELO ESTATÍSTICO PARA APLICAÇÕES NO PLANEJAMENTO DE  
SISTEMAS MÓVEIS CELULARES EM AMBIENTE *INDOOR* MULTIFONTES**

**ROSELY DOS ANJOS LIMA**

**DM – 32/2005**

**UFPA/CT/PPGEE**  
**Campus Universitário do Guamá**  
**Belém-Pará-Brasil**  
**2005**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ROSELY DOS ANJOS LIMA**

**MODELO ESTATÍSTICO PARA APLICAÇÕES NO PLANEJAMENTO DE  
SISTEMAS MÓVEIS CELULARES EM AMBIENTE *INDOOR* MULTIFONTES**

**DM – 32/2005**

**UFPA/CT/PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil  
2005**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**  
**CENTRO TECNOLÓGICO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ROSELY DOS ANJOS LIMA**

**MODELO ESTATÍSTICO PARA APLICAÇÕES NO PLANEJAMENTO DE  
SISTEMAS MÓVEIS CELULARES EM AMBIENTE *INDOOR* MULTIFONTES**

Dissertação de Mestrado submetida à  
Banca Examinadora do Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica  
para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Elétrica.

**UFPA/CT/PPGEE**  
**Campus Universitário do Guamá**  
**Belém-Pará-Brasil**  
**2005**

L732m LIMA, Rosely dos Anjos  
Modelo estatístico para aplicações no planejamento de sistemas móveis celulares em ambiente *indoor* multifontes / Rosely dos Anjos Lima;  
Orientador, Gervásio Protásio dos Santos Cavalcante. — 2005

Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Pará, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belém, 2005.

1. Sistema de comunicação móvel. 2. Ondas de rádio — propagação. I. título.

CDD – 21. ed. 621.3845

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**MODELO ESTATÍSTICO PARA APLICAÇÕES NO PLANEJAMENTO DE  
SISTEMAS MÓVEIS CELULARES EM AMBIENTE *INDOOR* MULTIFONTES**

**AUTORA:** ROSELY DOS ANJOS LIMA

DISSERTAÇÃO DE Mestrado submetida à avaliação da Banca Examinadora aprovada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará e julgada adequada para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica na área de Telecomunicações.

APROVADA EM 15/12/2005

BANCA EXAMINADORA:

---

**Prof. Dr. Gervásio Protásio dos Santos Cavalcante  
(ORIENTADOR - UFPA)**

---

**Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes  
(MEMBRO – UFPA)**

---

**Prof. Dr. Agostinho Luiz da Silva Castro  
(MEMBRO – UFPA)**

---

**Prof. Dr. Hermínio S. Gomes  
(MEMBRO EXTERNO – UFPA)**

**Visto:**

---

**Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes  
(COORDENADOR DO PPGE/CT/UFPA)**

**UFPA/CT/PPGEE**

*Dedico a minha dissertação em primeiro lugar a Deus, que para mim é a fonte de toda a minha inspiração e que através da fé, me dá a força necessária, saúde, guia e luz em meu caminho para superar todos os obstáculos.*

*A minha mãe JANIRA, que sempre me deu apoio para que nunca desistisse da minha caminhada de estudos, que sempre me instigou a buscar e alcançar as minhas metas.*

*A todos os meus familiares e amigos que sempre estiveram próximos e mesmo a distância nunca deixaram de torcer por mim.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por tudo e por todos que ele colocou em meu caminho.

Agradeço a Universidade Federal do Pará.

Agradeço a minha mãe JANIRA por tudo, por todos os momentos, sua presença é fundamental em minha vida.

Agradeço a minha avó JANDIRA por seu apoio e suporte durante muitas fases em minha vida.

Ao meu orientador, Prof. Dr. GERVÁSIO, que me confiou o desafio de tornar possível realizar este trabalho que se apresentou de maneira desafiadora, mas não menos interessante, por ter me oferecido com sua sabedoria o suporte para a construção desta dissertação.

Ao grande companheiro de estudos, ANTONIO DE ALMEIDA NEVES, Engenheiro de Telecomunicações da Oi, amigo de todas as horas, que sempre esteve presente direta ou indiretamente, ajudando sem medir esforços na elaboração deste trabalho. Com acesso aos equipamentos e dados que foram a base de estudo desta dissertação. Obrigada por toda a sua força e motivação. Além disso, a CLAUDENICE PALHA por toda a sua assessoria prestada no decorrer dos anos para tornar o ambiente de estudo muito agradável.

Agradeço aos responsáveis pelo Shopping Castanheira.

Agradeço em especial ao professor Dr. MICHEL DAUOD YACOUB da UNICAMP - Universidade de Campinas, que me permitiu utilizar como ferramentas de tratamento de dados, as distribuições estatísticas desenvolvidas por ele, com repasse de algumas orientações. Além dele, ao professor FÁBIO CÉZAR MARTINS da UEL – Universidade Estadual de Londrina, por todo o intercâmbio que tivemos através de *e-mails* e telefonemas, vital na implementação das distribuições estatísticas criadas pelo professor Michel.

Como não poderia deixar de lembrar, sou grata a todos os colegas da turma do Mestrado, que proporcionaram momentos alegres no decorrer das aulas e até mesmo fora, com toda a motivação e entusiasmo.

Reconheço a enorme ajuda oferecida pelos engenheiros CLEBER VALDIR RIBEIRO, RILTON SILVA, MAURO SOLANO, enfim a todos que ajudaram direta ou indiretamente na elaboração deste trabalho.

Agradeço aos colegas professores SIMONE FRAIHA, HERMÍNIO GOMES, JOSIANE RODRIGUES, e a REGIANE BARBOSA, pela ajuda de grande importância nas campanhas de medições e na análise dos dados do trabalho.

Agradeço a minha irmã MARIANA, minha cunhada SARA LÚCIA, e a meus sobrinhos GABRIEL RODRIGO e MARIA EMÍLIA.

Agradeço em especial a CIBHY AYAN NETO por toda a sua torcida e motivação.

Agradeço a CAPES pelo apoio financeiro fornecido através de bolsa.



“Quem acredita sempre alcança”  
(Renato Russo)

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE ACRÔNIMOS</b>	xii
<b>LISTA DE TABELAS</b>	xiii
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	xiv
<b>RESUMO</b>	xvi
<b>ABSTRACT</b>	xvii
<b>INTRODUÇÃO</b>	1
<b>CAPÍTULO 1 - CARACTERIZAÇÃO DO CANAL <i>INDOOR</i></b>	4
1.1 Introdução	4
1.2 Caracterização do Canal	5
1.2.1 Modelos de propagação <i>indoor</i>	6
1.2.1.1 Modelos Empíricos	8
1.2.1.2 Modelo de Rede Neural	9
1.2.2 Canal com Desvanecimento	10
1.2.2.1 Desvanecimento lento	12
1.2.2.2 Desvanecimento rápido	12
1.2.3 Fenômenos de Propagação	13
1.3 Tratamento Estatístico	15
1.3.1 Histórico	15
1.3.2 Modelo Físico	16
1.3.3 Distribuições Estatísticas	16
1.3.3.1 Distribuição de Rayleigh	18
1.3.3.2 Distribuição de Rice	19
1.3.3.3 Distribuição de Nakagami-m	21
1.3.3.4 Distribuição Kappa-mi	22
1.3.3.5 Distribuição Eta-mi	24
1.4 Resumo do capítulo	27
<b>CAPÍTULO 2 – MODELO PROPOSTO PARA AMBIENTE <i>INDOOR</i></b>	28
2.1 Introdução	28
2.2 Ambiente analisado	28
2.2.1 Configuração das antenas	30
2.3 Campanha de medições	33
2.3.1 Procedimento de medições	34

<b>2.4 Modelo Proposto</b>	37
<b>2.5 Resumo do capítulo</b>	41
<b>CAPÍTULO 3 – RESULTADOS OBTIDOS</b>	42
<b>3.1 Caso 1: Ambiente com apenas um transmissor</b>	42
<b>3.1.1 Avaliação da Radial 1</b>	44
<b>3.1.2 Avaliação da Radial 2</b>	49
<b>3.1.3 Avaliação da Radial 3</b>	53
<b>3.2 Caso 2: Ambiente com dois transmissores</b>	56
<b>3.2.1 Avaliação da Radial 1</b>	58
<b>3.2.2 Avaliação da Radial 2</b>	61
<b>3.2.3 Avaliação da Radial 3</b>	65
<b>3.2.4 Avaliação da Radial 4</b>	69
<b>CONCLUSÃO</b>	74
<b>REFERÊNCIAS</b>	76
<b>ANEXO</b>	78

## LISTA DE ACRÔNIMOS

- ADSL** – *Asynchronous Digital Subscriber Line*
- BTS** – *Base Transceiver Station*
- CW** – *Continuous Wave*
- DECT** – *Digital Enhanced Cordless Telephone*
- DAS** – *Distributed Antennas System*
- FDTD** – *Finite Difference Time Domain*
- FDP** – *Função Distribuição de Probabilidade*
- EIRP** – *Effective Isotropic Radiated Power*
- GPS** – *Global Positioning System*
- GSM** – *Global System for Mobile Communication*
- HF** – *High Frequency (3 MHz – 30 MHz)*
- LoS** – *Line of Sight*
- PACS** – *Personal Access Communications System*
- PCS** – *Personal Communication System*
- PHS** – *Personal Handyphone System*
- RF** – *Radio Frequency*
- RNA** – *Rede Neural Artificial*
- SHF** – *Super High Frequency (3000 MHz – 30 GHz)*
- TEMS** – *Test Ericsson Mobile System*
- UHF** – *Ultra High Frequency (300 MHz – 3 GHz)*
- UTD** – *Uniform Theory of Diffraction*
- VDSL** – *Very-High-Data-Rate Digital Subscriber Line*
- VHF** – *Very High Frequency (30 MHz – 300 MHz)*
- WLAN** – *Wireless Local Area Network*
- WPBX** – *Wireless Private Branch Exchange*

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 3.1</b>	– Resultado do teste do qui-quadrado ( $\chi^2$ ) – Radial 1.	46
<b>Tabela 3.2</b>	– Dados do modelo proposto para a Radial 1.	48
<b>Tabela 3.3</b>	– Erros do modelo proposto – Radial 1.	49
<b>Tabela 3.4</b>	– Resultado do teste do qui-quadrado ( $\chi^2$ ) – Radial 2.	51
<b>Tabela 3.5</b>	– Dados do modelo proposto para a Radial 2.	52
<b>Tabela 3.6</b>	– Erros do modelo proposto – Radial 2.	53
<b>Tabela 3.7</b>	– Resultado do teste do qui-quadrado ( $\chi^2$ ) – Radial 3	54
<b>Tabela 3.8</b>	– Dados do modelo proposto para a Radial 3.	55
<b>Tabela 3.9</b>	– Erros do modelo proposto – Radial 3.	56
<b>Tabela 3.10</b>	– Resultado do teste do qui-quadrado ( $\chi^2$ ) – Radial 1.	60
<b>Tabela 3.11</b>	– Dados do modelo proposto para a Radial 1.	60
<b>Tabela 3.12</b>	– Erros do modelo proposto – Radial 1.	61
<b>Tabela 3.13</b>	– Resultado do teste do qui-quadrado ( $\chi^2$ ) – Radial 2.	63
<b>Tabela 3.14</b>	– Dados do modelo proposto para a Radial 2.	64
<b>Tabela 3.15</b>	– Erros do modelo proposto – Radial 2.	65
<b>Tabela 3.16</b>	– Resultado do teste do qui-quadrado ( $\chi^2$ ) – Radial 3.	67
<b>Tabela 3.17</b>	– Dados do modelo proposto para a Radial 3.	68
<b>Tabela 3.18</b>	– Erros do modelo proposto – Radial 3.	69
<b>Tabela 3.19</b>	– Resultado do teste do qui-quadrado ( $\chi^2$ ) – Radial 4.	71
<b>Tabela 3.20</b>	– Dados do modelo proposto para a Radial 4.	72
<b>Tabela 3.21</b>	– Erros do modelo proposto – Radial 4.	73

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b>	– Escalas dos desvanecimentos rápido e lento.	11
<b>Figura 1.2</b>	– Nakagami-m como fronteira entre Kappa-mi e Eta-mi.	27
<b>Figura 2.1</b>	– Área do supermercado do <i>shopping</i> onde foram realizadas medições.	29
<b>Figura 2.2</b>	– Outra visão do supermercado do <i>shopping</i> .	29
<b>Figura 2.3</b>	– Antena omnidirecional usada no <i>shopping</i> .	30
<b>Figura 2.4</b>	– (a) Antena Painel utilizada no <i>shopping</i> . (b) Diagrama de irradiação da antena do tipo painel usada no <i>shopping</i> .	32
<b>Figura 2.5</b>	– Diagrama unifilar – Interior do <i>shopping</i> .	32
<b>Figura 2.6</b>	– TEMS <i>Pocket</i> para GSM (detalhe).	34
<b>Figura 2.7</b>	– Tela do programa utilizado para a coleta de dados.	35
<b>Figura 2.8</b>	– Procedimento para a realização da medição.	36
<b>Figura 2.9</b>	– Localização dos pontos coletados na planta.	37
<b>Figura 2.10</b>	– Ilustração de como obter a distância $d_2$ que se refere à distância do $Tx_2$ até o ponto do receptor na radial escolhida na distância $d_1$ .	41
<b>Figura 3.1</b>	– Gráfico de contorno de intensidade de sinal na praça de alimentação.	43
<b>Figura 3.2</b>	– Praça de alimentação dividida em radiais.	44
<b>Figura 3.3</b>	– Desvanecimento lento e rápido – Radial 1.	45
<b>Figura 3.4</b>	– Gráfico de ajuste dos dados pela FDPs – Radial 1.	46
<b>Figura 3.5</b>	– Gráfico de ajuste dos dados pelas FDPs, ilustrando a distribuição Kappa-mi – Radial 1.	47
<b>Figura 3.6</b>	– Gráfico dos dados medidos em comparação ao modelo proposto – Radial 1.	49
<b>Figura 3.7</b>	– Desvanecimento lento e rápido – Radial 2.	50
<b>Figura 3.8</b>	– Gráfico de ajuste dos dados pelas FDPs – Radial 2.	51
<b>Figura 3.9</b>	– Gráfico dos dados medidos em comparação ao modelo proposto – Radial 2.	52
<b>Figura 3.10</b>	– Desvanecimento lento e rápido – Radial 3.	53
<b>Figura 3.11</b>	– Gráfico de ajuste dos dados pelas FDPs – Radial 3.	54

<b>Figura 3.12</b>	– Gráfico dos dados medidos em comparação ao modelo proposto – Radial 3.	55
<b>Figura 3.13</b>	– Gráfico de contorno de intensidade de sinal no supermercado.	57
<b>Figura 3.14</b>	– Supermercado dividido em radiais.	58
<b>Figura 3.15</b>	– Desvanecimento lento e rápido – Radial 1.	59
<b>Figura 3.16</b>	– Gráfico de ajuste dos dados pelas FDPs – Radial 1.	59
<b>Figura 3.17</b>	– Gráfico dos dados medidos em comparação ao modelo proposto – Radial 1.	61
<b>Figura 3.18</b>	– Desvanecimento lento e rápido – Radial 2.	62
<b>Figura 3.19</b>	– Gráfico de ajuste dos dados pelas FDPs – Radial 2.	63
<b>Figura 3.20</b>	– Gráfico dos dados medidos em comparação ao modelo proposto – Radial 2.	65
<b>Figura 3.21</b>	– Desvanecimento lento e rápido – Radial 3.	66
<b>Figura 3.22</b>	– Gráfico de ajuste dos dados pelas FDPs – Radial 3.	67
<b>Figura 3.23</b>	– Gráfico dos dados medidos em comparação ao modelo proposto – Radial 3.	69
<b>Figura 3.24</b>	– Desvanecimento lento e rápido – Radial 4.	70
<b>Figura 3.25</b>	– Gráfico de ajuste dos dados pelas FDPs – Radial 4.	71
<b>Figura 3.26</b>	– Gráfico dos dados medidos em comparação ao modelo proposto – Radial 4.	73

## RESUMO

O projeto de sistemas de comunicações móveis requer o conhecimento do ambiente em que será implementado. Para tanto, busca-se a exatidão na predição de propagação do sinal através do uso de modelos de predição. O presente trabalho propõe um modelo empírico para a estimativa da intensidade de sinal recebida em ambientes *indoor*, e que apresentam mais de uma fonte transmissora, utilizando Sistema de Antenas Distribuídas (DAS). O método apresenta uma generalização para o caso de múltiplas fontes, também chamado multifontes, e como caso particular com apenas uma fonte. A modelagem é feita através do uso de radiais partindo de cada transmissor, com o intuito de considerar a variabilidade do sinal em ambientes *indoor*. Estas várias perturbações no sinal, que causam desvanecimento rápido são caracterizadas através das distribuições estatísticas de desvanecimento. As mais utilizadas como a de Rayleigh, Rice e Nakagami são apresentadas para caracterização do canal, além dessas são calculadas as distribuições recentemente desenvolvidas, de Kappa-mi e Eta-mi. Para a validação do modelo realizaram-se campanhas de medições em um *shopping center*, que possui um DAS, com o teste em dois ambientes distintos, um supermercado e uma praça de alimentação. As simulações são realizadas no software MATLAB<sup>®</sup> e o desempenho dos resultados avaliados através do cálculo dos erros absoluto, desvio padrão e erro rms.

**Palavras-chave:** *propagação indoor, multifontes, modelamento estatístico, desvanecimento.*



## ABSTRACT

The project of systems of mobile communications requires the knowledge of the environment where it will be implemented. For so much, the accuracy is looked for in the prediction of propagation of the signal through the use of prediction models. The present work proposes an empirical model for estimating of the signal strength received in indoor environments that presents more than indoor transmitter source, using Distributed Antennas Systems (DAS). The method presents a generalization for the case of multiple sources, also called multisources and as particular case to only one source. The modeling is made through the use of radial go away of each transmitter, with aim to consider the variability of the signal in indoor environments. These some disturbances in the signal, that they cause fast fading; they are characterized through the statistical distributions of fading. The most used as of Rayleigh, Rice and Nakagami are presented for characterization of the channel; besides the distributions recently developed are calculated, so Kappa-mi and Eta-mi. For the validation of the model, campaigns of measurements in shopping center were made, where possesses one DAS, with the test in two distinct environments, a supermarket and a feeding square. The simulations are carried out through using the software MATLAB® and the performance of the results evaluated through the calculation of the absolute error, standard deviation and rms error.

**Keywords:** *indoor, multisources, statistical modeling, fading.*

## INTRODUÇÃO

A evolução das comunicações móveis é resultado da necessidade que as pessoas têm em comunicar-se, onde quer que estejam. Dessa forma, observa-se que a comunicação móvel vem tendo um crescente e rápido desenvolvimento em termos de inovação tecnológica. O desempenho de comunicações sem fio de alta capacidade em prédios é limitado pelas características de propagação. Assim, é importante entender como o meio físico age sobre o ambiente de propagação, e por conta disso, se faz necessário medir o sinal e buscar a caracterização do mesmo [1][2][3].

A propagação de sinais de rádio em ambientes *indoor* tem recebido grande atenção para aplicações dentro de escritórios, centros de convenções, fábricas, universidades, prédios residenciais, etc. Ter modelos de propagação precisos e simples é de suma importância para o projeto e o desenvolvimento de ferramentas de planejamento de sistemas móveis [4][5][6][7].

Há vários modelos para caracterização de ambientes *indoor* descritos na literatura [3]. O canal de rádio móvel possui variações na perda do sinal em propagação que ocorre devido ao movimento do receptor móvel com relação ao transmissor fixo. Essas perdas são caracterizadas em duas escalas: larga escala, também chamada de sombreamento, apresenta variações lentas sobre muitos comprimentos de onda; e pequena escala, também chamada de interferência, onde ocorrem variações rápidas em poucos comprimentos de onda. Esses modelos utilizam para a sua composição a avaliação da perda em larga escala, sendo que na sua maioria a componente estatística é caracterizada por uma distribuição Log-normal. Para a composição de modelos empíricos aplica-se em grande parte a

componente de desvanecimento de larga escala, conhecida como desvanecimento lento. Nesse trabalho, como diferencial, busca-se avaliar a componente de perda em pequena escala, também chamada de desvanecimento rápido para acrescentar a um modelo empírico.

Desta forma, a proposta para o tratamento do ambiente *indoor* escolhido é usar um modelo empírico, adicionando a ele um termo estatístico com caracterização da parcela de desvanecimento rápido, fenômeno degradante do sinal e muito freqüente em ambientes *indoor*. As distribuições estatísticas utilizadas foram as de Rayleigh, Rice e Nakagami, que têm o seu uso bastante difundido na literatura. E como diferencial, serão utilizadas as distribuições recentemente desenvolvidas pelo professor Michel Yacoub, da UNICAMP, Kappa-mi e Eta-mi [8].

Com o modelo pretende-se caracterizar as perdas de propagação dentro de prédios em freqüências na faixa de UHF (*Ultra High Frequency*). Especificamente, através da utilização do modelo empírico proposto que será avaliado através de dados coletados de intensidade de sinal em um *shopping center*, na freqüência de 1800 MHz. Obtendo assim o conhecimento da propagação do sinal em ambientes com Sistema de Antenas Distribuídas (na sigla em inglês, DAS), visto que apresentam múltiplas fontes (antenas), irradiando o mesmo sinal simultaneamente. Com esses resultados é possível melhor prever o sinal propagado e prever novas áreas de cobertura.

Este trabalho está organizado da seguinte forma:

No Capítulo 1 será apresentada uma caracterização do canal *indoor*, abordando os modelos de propagação *indoor*, canal com desvanecimento, lento e rápido, assim como o tratamento estatístico do canal através de funções distribuições de probabilidade, as distribuições de Rayleigh, Rice, Nakagami-m,

bastante utilizadas em modelos estatísticos e as distribuições de Kappa-mi e de Eta-mi. O Capítulo 2 tratará do modelo proposto, juntamente com o ambiente analisado, os procedimentos e as campanhas de medições. Os resultados obtidos serão mostrados no Capítulo 3, através do uso de uma análise estatística dos erros entre o modelo proposto e os dados de medição. E por fim, a Conclusão, onde serão apresentados os resultados e as contribuições, assim como a proposta dos trabalhos futuros.

## CAPÍTULO 1 – CARACTERIZAÇÃO DO CANAL *INDOOR*

### 1.1 Introdução

A necessidade de um projeto *indoor* se dá por dois motivos: ou para corrigir deficiência de cobertura *indoor* e/ou para incrementar a capacidade de tráfego em um local de grande movimento. Isso ocorre quando a estrutura de macrocélulas de uma região não é suficiente para garantir a cobertura *indoor* ou demanda de tráfego de certo local [1].

O objetivo básico no planejamento celular *indoor* é, como para o planejamento celular “tradicional”, planejar uma boa cobertura, capacidade e, ao mesmo tempo, obter o mínimo de interferência possível.

Informações sobre a estrutura do prédio, materiais, e ambiente de rádio devem ser coletadas para prever as características de propagação de rádio *indoor* para um prédio particular. Baseado na análise dos dados coletados, um modelo de predição pode ser gerado para a seleção do local da microcélula *indoor* [1][2]. Além de todas essas informações citadas é importante ao projetista ter conhecimento do canal para melhor caracterizar o ambiente e prever o sinal em determinada área de cobertura [9].

O presente capítulo objetiva caracterizar o canal *indoor*, através da apresentação dos métodos estatísticos que compõem o modelo proposto.

## 1.2 Caracterização do Canal

Os sistemas de comunicações sem fio *indoor* são muito significativos no emprego de comunicações pessoais. A comunicação de rádio *indoor* cobre uma grande variedade de situações desde comunicações com indivíduos caminhando em prédios residenciais ou de escritórios, supermercados ou *shopping centers*, etc., até estações fixas enviando mensagens a robôs em movimento em linha de montagem em indústrias e fábricas [1][2].

Atualmente, tem-se presenciado uma grande demanda no aumento de velocidade das telecomunicações. O advento da Internet e redes de dados têm elevado essa demanda. A mobilidade e facilidade de instalação tornam as redes de comunicação sem fio um dos sistemas de comunicação mais importantes a serem empregados. Sistemas de Comunicações Pessoais (na sigla em inglês, PCS), redes locais sem fio (na sigla em inglês, WLANs), centrais privadas de ramais sem fio (na sigla em inglês, WPBXs), e outros, são os serviços que estão sendo empregados em áreas *indoor* em escala crescente. E novas aplicações estão sendo integradas às tecnologias emergentes como ADSL, VDSL, etc. O mercado desses serviços atende às necessidades de comunicação existentes em escritórios, *shoppings*, escolas, hospitais e fábricas [9][10]. O emprego em grande escala desses serviços é um grande desafio aos projetistas de rede, visto que o canal de rádio *indoor* tem uma quantidade enorme de deficiências e variabilidades [4].

Em um sistema *indoor* típico uma antena fixa instalada em uma posição elevada comunica-se com usuários dentro do prédio. Devido aos fenômenos da reflexão, refração e espalhamento de ondas de rádio pelas estruturas dentro de um prédio, o sinal transmitido mais frequentemente alcança o receptor por mais de um

percurso, resultando num fenômeno conhecido como desvanecimento de multipercurso. As componentes do sinal chegam de vários percursos indiretos e o percurso direto e são combinadas produzindo uma versão distorcida do sinal transmitido. O sinal recebido é corrompido por efeitos aleatórios indesejados como a interferência co-canal e o ruído [11][12].

A caracterização do canal é geralmente realizada sobre uma base experimental. Modelos estatísticos são validados de acordo com os dados medidos e então aplicados à análise e simulação de sistemas sem fio. Em particular, o comportamento estatístico do desvanecimento afeta o desempenho do sistema [3]. Se o meio é bem caracterizado, transmissor e receptor podem ser projetados para se ajustar ao canal e reduzir o efeito dessas perturbações.

### **1.2.1 Modelos de propagação *indoor***

Um modelo de propagação é um conjunto de expressões matemáticas, diagramas e algoritmos usados para representar as características de rádio de um dado ambiente. Geralmente, os modelos de predição podem ser empíricos ou teóricos (também chamados determinísticos), ou uma combinação dos dois. Enquanto os modelos empíricos são baseados em medidas, os modelos teóricos lidam com os princípios fundamentais de fenômenos de propagação de ondas de rádio [10].

Nos modelos empíricos, todas as influências do meio são implicitamente levadas em conta, embora elas possam ser reconhecidas separadamente. Essa é a principal vantagem desses modelos [10]. Por outro lado, a precisão desses modelos depende não somente da precisão das medidas, mas também das similaridades

entre o meio a ser analisado e o meio de onde as medições foram coletadas. A eficiência computacional desses modelos é normalmente satisfatória.

Os modelos determinísticos são baseados nos princípios da física e, devido a isso, eles podem ser aplicados a diferentes meios sem afetar a precisão. Na prática, sua utilização geralmente requer um enorme banco de dados de características do meio, o qual é muitas vezes impraticável ou impossível de obter. Os algoritmos usados pelos modelos determinísticos são geralmente muito complexos e necessitam de uma boa eficiência computacional. Por essa razão, a implementação dos modelos determinísticos é comumente restrita a áreas menores de ambientes microcelulares e *indoor*. Contudo, se os modelos determinísticos são corretamente calculados, maior precisão da predição pode ser esperada em comparação aos dos modelos empíricos [10].

Por causa do meio de rádio, os modelos de predição podem ser classificados dentro de duas categorias principais, modelos de propagação *outdoor* e *indoor*. Além disso, com relação ao tamanho da área de cobertura, os modelos de propagação *outdoor* podem ser subdivididos em duas classes adicionais, modelos de predição macrocelular e microcelular.

Como o presente trabalho refere-se a um ambiente *indoor*, será dada uma maior abordagem aos modelos para o tratamento da propagação do sinal *indoor*. A predição de intensidade de sinal em ambientes *indoor* parece ser mais fácil que a predição *outdoor*. Porém, medidas mostram que a variação da intensidade de sinal pode ser muito alta (acima de 80 dB) [10]. Essa diferença pode ser explicada pelo fato que em um local específico, o campo elétrico do ambiente *indoor* é formado por um número muito maior de componentes indiretas que no caso do *outdoor*. Portanto,



o nível de sinal *indoor* é mais flutuante que o sinal *outdoor*, e dessa forma é mais difícil prever.

O problema do nível de predição *indoor* pode ser considerado estatisticamente ou teoricamente. Enquanto quase todos os modelos empíricos sejam baseados no mesmo modelo geral, há vários modelos teóricos distintos entre eles os de Traçados de Raios e de Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (na sigla em inglês, FDTD) que estão entre os mais conhecidos. Algumas desvantagens de ambos os modelos empíricos e teóricos podem ser superadas usando-se um modelo apropriado de Rede Neural Artificial (RNA) [10].

A idéia geral de cada um dos modelos apresentados pode ser facilmente aplicada a qualquer faixa de frequência específica. Porém, a faixa de frequências de 1,8-2 GHz é de importância particular já que os maiores sistemas de rádio *indoor* operam hoje nessa banda (nas siglas em inglês, DECT, PACS, PHS, etc.).

### 1.2.1.1 Modelos Empíricos

O modelo empírico geral pode ser expresso como:

$$P_L(d) = P_L(d_0) + 10 \cdot \gamma \cdot \log(d/d_0) + X\sigma \quad (1.1)$$

Sendo  $P_L(d)$  a perda de percurso em dB na distância  $d$ ,  $P_L(d_0)$  a perda de percurso conhecida na distância de referência (normalmente  $d_0 = 1$  m),  $\gamma$  denota o expoente de perda dependente do meio de propagação, e  $X\sigma$  a variável aleatória representando a incerteza do modelo. Muitos modelos empíricos têm sido baseados nessa formulação. Esses modelos são simples e adequados à implementação computacional. Durante a implementação, o banco de dados do meio torna-se desnecessário. Isso é uma vantagem, por não haver disponibilidade para investir

tempo e recursos no estudo de *layout* dos prédios. Devido à simplicidade do modelo, uma grande precisão não é esperada. O seu parâmetro principal, o expoente  $\gamma$ , é muito sensível ao meio de propagação, isto é, ao tipo de material de construção, tipo de interior, local dentro do prédio, etc. Os valores variam de 1,2 (efeito de guia de onda) a 6. Além disso, o valor de  $\gamma$  depende da maneira com que se realizam as análises estatísticas dos dados de medições [10].

### **1.2.1.2 Modelo de Rede Neural**

O principal problema apresentado por modelos empíricos é sua precisão por vezes insatisfatória. Por outro lado, os modelos teóricos necessitam de eficiência computacional. O modelo de RNA teria como compromisso um ajuste entre os dois problemas apresentados [10].

Esse modelo pode ser baseado nas redes neurais realimentadas de multicamadas. A realização de um modelo RNA requer um banco de dados com a intensidade de campo do ambiente e da distância classificando cada local tratado dentro de várias categorias, como por exemplo, parede, corredor, sala de aula, janela, etc.

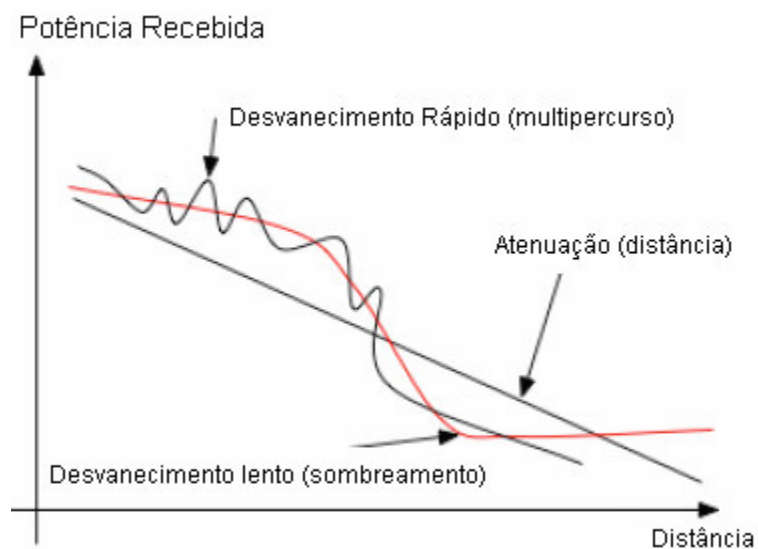
Determinar esses parâmetros do modelo RNA é muito simples. A análise estatística é inicialmente desnecessária. A RNA deve apenas ser treinada com os dados medidos. Computacionalmente o processo de treinamento é muito demorado, mas ele é feito somente uma vez. Em resumo, tem-se mostrado que a precisão do modelo RNA é comparável com a precisão dos modelos FDTD e Traçado de Raios [10].

### 1.2.2 Canal com Desvanecimento

Desvanecimento é um fenômeno que ocorre quando a amplitude e fase de um sinal de rádio variam rapidamente dentro de um curto período de tempo ou distância, como ilustrado na Figura 1.1. O desvanecimento é causado por interferência entre duas ou mais versões do sinal transmitido que chegam ao receptor em instantes ligeiramente diferentes. Essas ondas com múltiplos percursos que chegam à antena receptora se combinam formando um sinal resultante que pode variar de forma intensa tanto em amplitude quanto em fase.

Em um canal de comunicação móvel, tal como o ambiente celular e o canal de satélite, o desvanecimento e as interferências dos múltiplos percursos são causados principalmente pelas reflexões na superfície terrestre e em construções. Além disso, o movimento relativo entre o transmissor e o receptor resulta em uma modulação aleatória de frequência no sinal devido aos diferentes deslocamentos Doppler em cada componente dos múltiplos percursos [4]. O movimento dos objetos entre o transmissor e receptor também provoca um deslocamento Doppler nas componentes dos múltiplos percursos. Basicamente, o canal com desvanecimento possui uma resposta impulsiva variante no tempo. O desvanecimento provoca flutuações na amplitude e fase do sinal recebido. As componentes dos múltiplos percursos provocam interferência entre símbolos (*ISI – Intersymbol Interference*) quando o período de símbolo for menor que o maior atraso dos múltiplos percursos [10]. Se o período de símbolo for maior que o maior atraso dos múltiplos percursos tem-se apenas desvanecimento na potência do sinal recebido. Deslocamento Doppler provoca dispersão em frequência da portadora, ocasionando espalhamento

da banda do sinal. Todos esses fatores resultam na degradação de desempenho dos sistemas de comunicações.



**Figura 1.1** Escalas dos desvanecimentos rápido e lento.

Normalmente, o canal é modelado matematicamente. Existem três razões principais para a criação de modelos matemáticos para canais com múltiplos percursos [11][12]: A primeira, é ajudar a entender o canal e seus efeitos nos sinais de comunicação. A segunda, é que a modelagem matemática permite analisar os seus efeitos e produzir alguns resultados analiticamente. Por último, esta modelagem pode fornecer bases para a simulação em computadores do canal que, usualmente, são utilizados em situações em que a análise matemática sem auxílio de modelos é extremamente complexa.

Essa caracterização serve como modelo para sinais de transmissão em vários tipos de canais, tais como comunicação através de ondas ionosféricas ou celestes em ondas curtas na banda de HF, comunicações por ondas troposféricas na faixa de

microondas em UHF, SHF e por espalhamento ionosférico na faixa das ondas métricas em VHF.

### **1.2.2.1 Desvanecimento lento**

A propagação em desvanecimento lento pode ser resumida assim: as perdas no percurso dependem basicamente do ambiente de propagação, da distância entre transmissor e receptor e dizem respeito ao cálculo da potência média do sinal recebido. Essas perdas podem ser determinadas por métodos determinísticos ou empíricos [3].

### **1.2.2.2 Desvanecimento rápido**

O sinal que chega à antena receptora é considerado como sendo o resultante de vários sinais refletidos devido aos múltiplos percursos. Essas variações provocadas pelas condições do ambiente, pela movimentação do móvel e dos obstáculos existentes nas vizinhanças deste móvel, causam uma alteração na amplitude e na fase do sinal recebido, quando comparadas com o sinal original. Isso se classifica como um desvanecimento rápido.

O desvanecimento rápido é responsável pelas flutuações rápidas e profundas da potência do sinal recebido, em curtas distâncias (poucos metros) ou curtos intervalos de tempo (na ordem de segundos). Esse fenômeno é muito importante para a análise do desempenho de sistemas celulares [3].

As perdas por esse desvanecimento podem ser determinadas por métodos estatísticos, pois o sinal apresenta comportamento aleatório. Para cada tipo de canal

existe uma Função Distribuição de Probabilidade (FDP) apropriada para ser utilizada em sua modelagem.

A largura e a orientação das ruas, o tipo e a densidade dos edifícios nas vizinhanças do receptor, além de outros fatores, combinam-se influenciando no valor da média do sinal, de maneira que, somente para áreas pequenas, o processo pode ser considerado estatisticamente estacionário. A regularidade estatística dá credibilidade ao modelo.

### 1.2.3 Fenômenos de Propagação

Em sistemas de comunicações móveis pequenos deslocamentos espaciais podem resultar em grandes variações no nível do sinal recebido. A avaliação desses pequenos deslocamentos é feita através de métodos estatísticos.

Três fatores básicos são considerados em um modelo de predição de um sinal em propagação [3]:

**1) Perda de percurso:** Está relacionado com o cálculo da média de potência local do sinal recebido. Pode ser obtido através de modelos teóricos: propagação no espaço livre, modelo do terreno plano e modelo de difração para uma obstrução, ou através de métodos empíricos: Método de Okumura, formulação de Hata, Método de Lee e Método de Ibrahim-Parsons, Modelos de Difração (Modelo de Bullington, de Deygout e de Giovaneli) e Modelos de Reflexão (Altura efetiva de Okumura e Altura efetiva de Lee) [3].

**2) Efeitos de sombreamento:** São relativos às variações do sinal devido às obstruções no percurso transmissor-receptor. As variações ocorrem na média local do sinal, afetando apenas o desvanecimento lento.

**3) Efeitos de múltiplos percursos:** São causados devido às diversas ondas refletidas que se compõem na antena receptora. Essas ondas chegam por diferentes ângulos com diferentes tempos de propagação afetando apenas o desvanecimento rápido do sinal.

Um ambiente de propagação pode ser descrito como uma combinação desses três fatores, dependendo das características do mesmo.

Além desses efeitos descritos anteriormente, deve-se levar em conta o desvanecimento temporal e os efeitos do corpo humano, fenômenos que devem ser cuidadosamente considerados em um projeto particular de um sistema de comunicação *indoor*.

A influência de uma recepção do sinal no corpo humano pode ser vista através de dois aspectos principais [10]. O primeiro é a influência do corpo do próprio usuário e o segundo é o efeito dos corpos das pessoas que estão na vizinhança do usuário. Na média, efeitos dos corpos causam uma queda no nível de sinal recebido fluando mais irregularmente. Essas irregularidades são muito difíceis de prever devido a sua dependência maior com a presença de outras pessoas perto de usuários.

Para posições de transmissor e receptor fixos, o movimento no ambiente causa desvanecimento temporal. Nesse caso, variações típicas do nível de sinal são menores que 15 dB para 99,9% do tempo, que é aproximadamente maior que as variações tipicamente obtidas em um meio *outdoor* [10].

## 1.3 Tratamento Estatístico

### 1.3.1 Histórico

As primeiras pesquisas em busca da caracterização estatística de canais com desvanecimento foram feitas por Price e Rice [11][12]. Os estudos mais abrangentes dos modelos estatísticos começaram na década de 60. Nakagami e Clarke [12] começaram a utilizar distribuições estatísticas com o intuito de descrever as variações rápidas do sinal recebido.

Nas décadas de 70 e 80 surgiram novos trabalhos no desenvolvimento de distribuições que descrevessem de forma mais eficiente e precisa os ambientes de propagação. Suzuki e Hansen [13] realizaram estudos para descrever os efeitos sofridos pelo sinal devido ao sombreamento e múltiplos percursos. Além de novas distribuições, foram desenvolvidos trabalhos com o intuito de confirmar e validar as distribuições já desenvolvidas.

Essas novas FDPs foram sendo estudadas sempre com o objetivo de descrever as variações do sinal recebido, seja para variações de curto prazo ou de longo prazo. Recentemente, duas novas FDPs gerais de desvanecimento foram propostas na literatura [8]: a de Kappa-mi e a Eta-mi. A FDP Kappa-mi inclui como casos particulares a Rice, Nakagami-m, Rayleigh e Semi-Gaussiana Positiva. A FDP Eta-mi inclui como casos particulares a Hoyt (Nakagami-q), Nakagami-m, Rayleigh e Semi-Gaussiana Positiva.



### 1.3.2 Modelo Físico

Um ambiente considerado em um sistema de comunicação pode produzir no sinal, características de espalhamento homogêneo ou não homogêneo.

Para o ambiente homogêneo, pode-se dizer que chegará ao receptor um conjunto de sinais provenientes do sinal original. As FDPs mais conhecidas são calculadas considerando sua existência em um ambiente com espalhamento homogêneo. Por exemplo, se existir uma componente dominante dentre as ondas espalhadas, então a FDP de Rice será usada, caso contrário utiliza-se a de Rayleigh. Para o caso de se considerar medidas práticas realizadas na faixa de frequências UHF a distribuição de Nakagami será utilizada [14].

Para um ambiente não homogêneo, pode-se dizer que na recepção poderá chegar vários conjuntos de ondas, sendo que cada conjunto é formado tanto por ondas espalhadas como por uma componente dominante. Ainda, poderá acontecer de chegar ao receptor, somente parte desses conjuntos. As ondas espalhadas são consideradas como tendo potências iguais, mas a componente dominante apresentará uma potência arbitrária das demais. As FDPs Kappa-mi e Eta-mi consideram um ambiente não homogêneo.

### 1.3.3 Distribuições Estatísticas

Em um sistema de comunicação móvel, o sinal se propaga em um ambiente não estacionário, dificultando a análise por um método determinístico. Os diferentes tipos de superfícies irregulares causam difração, dispersão, reflexão e absorção do sinal. O sinal transmitido, interagindo com essas superfícies, gera

uma distribuição contínua deste sinal, onde amplitudes e fases variam de acordo com as propriedades dessas superfícies. No receptor, o sinal propagado chegará, então, através de múltiplos percursos [3].

São várias as interferências físicas que irão alterar as características do sinal até este chegar ao seu destino. O sinal transmitido poderá chegar ao receptor como resultado de um sombreamento causado por obstáculos, apresentando flutuações lentas em seu nível. Isso caracteriza um ambiente que apresenta desvanecimento lento. De outra forma, o sinal poderá chegar como resultado de múltiplas reflexões, que alteram a amplitude e a fase do sinal transmitido, ocorrendo um desvanecimento rápido, pois essa alteração ocorre de maneira rápida. Poderá ocorrer também uma combinação das duas situações anteriores, ou seja, no caso do sinal chegar ao receptor como resultado do sombreamento devido aos obstáculos e também como resultado de múltiplas reflexões. Ou ainda, ter como resultado um sinal que apresenta uma característica de linha de visada, ou seja, quando ocorrer propagação dentro de edifícios, as estruturas metálicas poderão funcionar como guias de onda, considerando, então, que o sinal chegará ao receptor como uma soma dos sinais refletidos mais o sinal direto [14].

Existe um grande número de FDPs, que descrevem as características do sinal se propagando em um ambiente de comunicação móvel celular, constituindo assim modelos, onde as expressões encontradas representam as características do sinal durante o percurso. Para validar as distribuições, exaustivas medidas de campo têm sido realizadas e os resultados mostram uma excelente aproximação entre estas medidas e os modelos considerados. As distribuições de Rice, Rayleigh e Nakagami são algumas das FDPs mais conhecidas e serão citadas ao longo deste trabalho.

Algumas distribuições citadas, tais como Rayleigh, Rice e Nakagami-m, são de grande utilidade prática, fornecendo uma descrição das estatísticas do sinal de rádio. A distribuição de Rayleigh descreve a envoltória do sinal recebido resultante de uma propagação com múltiplos percursos e sem uma Linha de Visada direta (na sigla em inglês, LoS) com potência predominante. A de Rice descreve a envoltória do sinal recebido resultante de uma propagação com múltiplos percursos mais uma componente em LoS. A distribuição de Nakagami-m utiliza um parâmetro para descrever o grau de desvanecimento sofrido pelo sinal se propagando em um ambiente de múltiplos percursos. A distribuição de Rayleigh é um caso particular da distribuição Nakagami-m [3].

As novas distribuições de desvanecimento Kappa-mi e Eta-mi consideram um sinal composto de um conjunto de ondas multipercurso se propagando em um meio não homogêneo.

### 1.3.3.1 Distribuição de Rayleigh

Um sinal se propagando em um ambiente Rayleigh tem a envoltória da sua componente de desvanecimento rápido modelada por uma distribuição dada por [3]:

$$p(r) = \frac{r}{\sigma_r^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_r^2}\right), \quad r \geq 0, \quad (1.2)$$

Sendo  $r$  a envoltória do sinal e  $\sigma_r^2$  a variância das componentes em fase e em quadratura que compõem o sinal  $r$ . A média é dada por  $\sigma_r\sqrt{\pi/2}$  e  $\sigma_r\sqrt{2-\pi/2}$  é o desvio padrão da distribuição.

Fazendo alteração de variáveis, obtém-se a distribuição de Rayleigh normalizada em relação ao valor *rms* dada por:

$$p(\rho) = 2\rho \exp(-\rho^2) \quad (1.3)$$

Sendo que  $\rho = r/\sqrt{\Omega}$  é a envoltória do sinal normalizada em relação ao valor *rms*  $\sqrt{\Omega}$ , e  $\Omega = E(r^2)$ , sendo que  $E(\cdot)$  é o valor esperado.

Em um ambiente de propagação de Rayleigh, o sinal na recepção é composto exclusivamente de ondas refletidas com amplitudes equivalentes. Portanto, não deve existir uma onda dominante chegando na recepção, ou seja, não deve existir LoS entre o transmissor e o receptor de acordo com o modelo estatístico de Rayleigh. No desenvolvimento teórico do ambiente de Rayleigh é considerado o fato dos ângulos de chegada das múltiplas ondas refletidas na recepção serem condicionados por uma distribuição uniforme de probabilidade, entre 0 e  $2\pi$  radianos. O modelo de desvanecimento Rayleigh, tipicamente, se ajusta bem com experimentos de sistemas móveis, onde não existe LoS entre o transmissor e receptor [3]. Essa modelagem também se aplica à propagação das ondas refletidas e refratadas através da troposfera e ionosfera e também nos enlaces de rádio nas comunicações marítimas [12].

### 1.3.3.2 Distribuição de Rice

A modelagem estatística feita a partir da distribuição de Rice é utilizada quando o sinal na recepção é composto pela combinação de uma onda dominante com diversas ondas refletidas de intensidade menor. A distribuição de Rice apresenta para sua envoltória a seguinte FDP [3]:

$$p(r) = \frac{r}{\sigma_r^2} \exp\left(-\frac{r^2 + a^2}{2\sigma_r^2}\right) I_0\left(\frac{ra}{\sigma_r^2}\right), \quad r \geq 0, \quad (1.4)$$

Sendo que  $\sigma_r^2$  é a potência dos sinais refletidos,  $a^2/2$  é a potência do sinal direto e  $I_0$  é a função de Bessel modificada de primeira classe e ordem zero. A função de Bessel modificada de primeira classe e ordem  $\nu$  é definida como:

$$I_\nu(z) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(z/2)^{\nu+2i}}{i! \Gamma(\nu+i+1)} \quad (1.5)$$

A função modificada de Bessel de ordem 0, pode ser definida usando  $\nu = 0$  em (1.5) ou usando sua fórmula integral, a seguir:

$$I_0\left(\frac{ax}{\sigma^2}\right) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp\left(\frac{ax \cos \theta}{\sigma^2}\right) d\theta \quad (1.6)$$

Fazendo a devida substituição de variáveis, pode-se obter a distribuição de Rice normalizada em relação ao seu valor *rms*, dada por:

$$\rho(\rho; K) = \frac{2(1+K)}{\exp(K)} \rho \exp[-(1+K)\rho^2] \cdot I_0[2\sqrt{K(1+K)}\rho] \quad (1.7)$$

Sendo  $K$  a razão entre a potência total da componente dominante e a potência total das componentes espalhadas, dada por:

$$K = \frac{a^2}{2\sigma^2} \quad (1.8)$$

No caso da inexistência de uma onda com potência predominante, ou seja,  $a = 0$ , a Equação (1.4) se reduz a uma distribuição de Rayleigh dada na Equação (1.2).

A distribuição de Rice [3] tem como característica sinais se propagando dentro de construções, como edifícios, onde as paredes atuam como espalhadores de ondas e os dutos, fiações e estruturas metálicas funcionam como guias de onda, canalizando um sinal direto até a antena receptora. Esses guias de onda proporcionam ao móvel receber um sinal com característica de LoS. Então, o sinal recebido será composto pela soma dos sinais refletidos mais um sinal direto com

potência predominante, ocorrendo a combinação dos efeitos de múltiplos percursos, devido as paredes, com o efeito de uma componente direta, devido aos guias de onda.

Esse tipo de desvanecimento é tipicamente observado em microcélulas em ambientes urbano e suburbano com LoS, picocélulas *indoor* e em fábricas [11]. Também se aplica a componente LoS em satélites e comunicações marítimas entre embarcações [12].

### 1.3.3.3 Distribuição de Nakagami-m

A distribuição de Nakagami-m [3] foi introduzida para caracterizar o desvanecimento rápido da propagação de sinais de HF de longas distâncias. A FDP é dada por:

$$\rho(r) = \frac{2}{\Gamma(m)} \left(\frac{m}{\Omega}\right)^m r^{2m-1} \exp\left(-\frac{mr^2}{\Omega}\right), \quad r \geq 0 \quad (1.9)$$

Sendo que  $\Gamma(\cdot)$  é a função Gama definida como

$$\Gamma(m) = \int_0^{\infty} x^{m-1} \exp(-x) dx \quad (1.10)$$

E  $m$  é o fator de desvanecimento dado por,

$$m = \frac{\Omega^2}{\text{Var}(r^2)} \quad (1.11)$$

Através de uma transformação de variáveis obtém-se a Equação (1.8) normalizada em relação ao seu valor *rms* dado por,

$$\rho(\rho) = \frac{2m^m}{\Gamma(m)} \rho^{2m-1} \exp(-m\rho^2) \quad (1.12)$$

Fazendo  $m = 1$ , observa-se que a Equação (1.12) resulta na distribuição de Rayleigh dada na Equação (1.3). Portanto, como observado por Nakagami, para valores de  $m > 1$  tem-se um desvanecimento menos intenso, e para valores de  $m < 1$  tem-se um desvanecimento mais severo.

### 1.3.3.4 Distribuição Kappa-mi

O modelo de desvanecimento para a distribuição Kappa-mi considera um sinal composto de grupos de ondas multipercursos se propagando em um meio não-homogêneo. Dentro de qualquer um dos grupos, as fases das ondas espalhadas são aleatórias e têm tempos de atraso similares com o espalhamento do tempo de atraso de diferentes grupos relativamente maiores. Os grupos de ondas multipercursos são ondas espalhadas com potências idênticas, mas dentro de cada grupo há uma componente dominante que apresenta potência arbitrária [8].

A distribuição Kappa-mi é uma distribuição geral de desvanecimento que pode ser usada para representar a variação rápida do desvanecimento do sinal, pois inclui as distribuições de desvanecimento mais conhecidas: Rice e Nakagami- $m$ , conforme demonstrado em [8]. As distribuições de Rice e Nakagami- $m$ , por sua vez, incluem a distribuição de Rayleigh. A distribuição de Nakagami- $m$  também inclui a distribuição Semi-Gaussiana Positiva. Assim, todas as FDPs citadas podem ser obtidas a partir da distribuição Kappa-mi. A distribuição Log-normal também pode ser bem aproximada pela distribuição Kappa-mi.

Para um sinal de desvanecimento com envoltória  $r$  e envoltória normalizada

$\rho = r/\hat{r}$ ,  $\hat{r} = \sqrt{E(r^2)}$  é o valor rms de  $r$ , e a FDP é dada por:

$$p(\rho) = \frac{2\mu(1+\kappa)^{\frac{\mu+1}{2}}}{\kappa^{\frac{\mu-1}{2}} \exp(\mu\kappa)} \rho^\mu \exp(-\mu(1+\kappa)\rho^2) I_{\mu-1}(2\mu\sqrt{\kappa(1+\kappa)}\rho) \quad (1.13)$$

Sendo que  $\kappa \geq 0$  é a razão entre a potência total das componentes dominantes e a potência total das ondas espalhadas,  $\mu = \frac{E^2(r^2)}{\text{Var}(r^2)} \times \frac{1+2\kappa}{(1+\kappa)^2}$  (ou, de forma equivalente,  $\mu = \frac{1}{\text{Var}(\rho^2)} \times \frac{1+2\kappa}{(1+\kappa)^2}$ ), e  $I_\nu(\cdot)$  é a função de Bessel modificada de primeira espécie e ordem arbitrária  $\nu$  ( $\nu$  é real).

Para um sinal de desvanecimento com potência  $\omega = r^2/2$  e potência normalizada  $\omega = \omega/E(\omega)$ , a FDP é dada por:

$$p(\omega) = \frac{\mu(1+\kappa)^{\frac{\mu+1}{2}}}{\kappa^{\frac{\mu-1}{2}} \exp(\mu\kappa)} \omega^{\frac{\mu-1}{2}} \exp(-\mu(1+\kappa)\omega) I_{\mu-1}(2\mu\sqrt{\kappa(1+\kappa)}\omega) \quad (1.14)$$

Os estimadores dos parâmetros  $\kappa$  e  $\mu$  podem ser calculados por:

$$\kappa = \frac{2(1-b) + \sqrt{1-b}}{4b-3}$$

e

$$\mu = \frac{1+2\kappa}{(1+\kappa)^2 (E[\rho^4] - 1)}$$

Sendo que  $b = \frac{E[\rho^6] - 3E[\rho^4] + 2}{2(E[\rho^4] - 1)^2}$ . Dessa forma a distribuição de Rice pode

ser obtida a partir da distribuição Kappa-mi fazendo-se  $\mu = 1$  em (1.13). Nesse caso, o parâmetro  $\kappa$  coincide com o parâmetro  $K$  de Rice. A partir da distribuição de Rice, fazendo-se  $\kappa = K = 0$  (ou seja,  $\mu = 1$  e  $\kappa \rightarrow 0$  na distribuição Kappa-mi) a distribuição de Rayleigh pode ser obtida de forma exata. Do mesmo modo, a partir da distribuição de Rice para  $\kappa = K = m-1 + \sqrt{m(m-1)}$ , (ou seja,  $\mu = 1$  e



$\kappa = K = m - 1 + \sqrt{m(m-1)}$  na distribuição Kappa-mi), onde  $m$  é o parâmetro de Nakagami, a distribuição de Nakagami- $m$  pode ser obtida de forma aproximada.

A distribuição de Nakagami- $m$  pode ser obtida a partir da distribuição Kappa-mi fazendo-se  $\mu = 1$  e  $\kappa \rightarrow 0$  em (1.13). Neste caso, o parâmetro  $\mu$  coincide com o parâmetro  $m$  de Nakagami. Para  $\mu = m = 1$  na distribuição de Nakagami (ou seja,  $\mu = 1$  e  $\kappa \rightarrow 0$  na distribuição Kappa-mi) a distribuição de Rayleigh pode ser obtida de forma exata. Do mesmo modo, fazendo-se  $\mu = m = 0,5$  na distribuição de Nakagami (o que equivale a fazer  $\mu = 0,5$  e  $\kappa \rightarrow 0$  na distribuição Kappa-mi) a distribuição Semi-Gaussiana Positiva pode ser obtida de forma exata.

A distribuição Log-normal, dada como uma função de  $m$ , também pode ser aproximada pela distribuição Kappa-mi para  $e^{-1} \leq \rho \leq e$ , e para  $\kappa \rightarrow 0$  e  $\mu = m$  [8].

### 1.3.3.5 Distribuição Eta-mi

O modelo de desvanecimento para a distribuição Eta-mi considera um sinal composto de grupos de ondas multipercursos se propagando em um meio não-homogêneo. Dentro de cada grupo, as fases das ondas espalhadas são aleatórias e têm tempos de atrasos similares com o espalhamento do tempo de atraso de diferentes grupos relativamente maiores. As componentes em fase e em quadratura do sinal com desvanecimento dentro de cada grupo têm potências diferentes.

A distribuição Eta-mi é uma distribuição geral de desvanecimento que inclui as distribuições de Hoyt, Nakagami- $m$ , Rayleigh e a Semi-Gaussiana Positiva como casos especiais, conforme demonstrado em [8].

Para um sinal de desvanecimento com envoltória  $r$  e envoltória normalizada  $\rho = r/\hat{r}$ , sendo  $\hat{r} = \sqrt{E(r^2)}$  o valor rms de  $r$ , a FDP Eta-mi é dada por:

$$\rho(\rho) = \frac{4\sqrt{\pi}\mu^{\mu+\frac{1}{2}}h^\mu}{\Gamma(\mu)H^{\mu-\frac{1}{2}}} \omega^{\mu-\frac{1}{2}} \exp(-2\mu h\omega) I_{\mu-\frac{1}{2}}(2\mu H\omega) \quad (1.15)$$

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

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

Bessel modificada de primeira espécie e ordem arbitrária  $\nu$  ( $\nu$  é real),  $\mu \geq 0$  e  $0 \leq \eta \leq 1$ .

Para um sinal de desvanecimento com potência  $\omega = r^2/2$  e potência normalizada  $\omega = \omega/E(\omega)$ , a FDP Eta-mi é dada por:

$$\rho(\omega) = \frac{2\sqrt{\pi}\mu^{\mu+\frac{1}{2}}h^\mu}{\Gamma(\mu)H^{\mu-\frac{1}{2}}} \omega^{\frac{\mu-1}{2}} \exp(-2\mu h\omega) I_{\mu-\frac{1}{2}}(2\mu H\omega) \quad (1.16)$$

Os estimadores dos parâmetros  $\eta$  e  $\mu$  podem ser calculados por:

$$\eta = \frac{1 - \sqrt{-1 - 2\mu + 2\mu E[\rho^4]}}{1 + \sqrt{-1 - 2\mu + 2\mu E[\rho^4]}}$$

e

$$\mu = \frac{-3 + 3E[\rho^4] + \sqrt{1 - 6E[\rho^4] + 9E[\rho^4]^2 - 4E[\rho^6]}}{4 - 6E[\rho^4] + 2E[\rho^6]}$$

A distribuição de Hoyt pode ser obtida a partir da distribuição em (1.16) de forma exata fazendo-se  $\mu = 0,5$ . A partir da distribuição de Hoyt a Semi-Gaussiana Positiva pode ser obtida fazendo-se  $\eta \rightarrow 0$ . A distribuição Semi-Gaussiana Positiva

é obtida fazendo-se  $\mu = 0,5$  e  $\eta \rightarrow 0$ , ou de forma equivalente, fazendo-se  $\mu = 0,25$  e  $\eta \rightarrow 1$ .

Da mesma forma, a partir da distribuição de Hoyt a distribuição de Rayleigh pode ser obtida de forma exata fazendo-se  $\eta = 1$ .

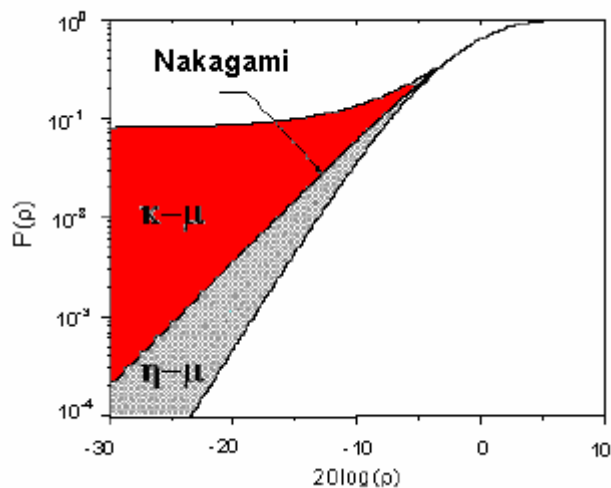
A distribuição de Nakagami-m pode ser obtida de forma exata a partir da distribuição Eta-mi para  $\mu = m$  e  $\eta \rightarrow 0$ , ou do mesmo modo, para  $\mu = m/2$  e  $\eta \rightarrow 1$ .

A distribuição de Rayleigh pode ser obtida fazendo-se  $\mu = 1$  e  $\eta \rightarrow 0$ , ou de forma equivalente, fazendo-se  $\mu = 0,5$  e  $\eta \rightarrow 1$ .

A distribuição de Rice pode ser obtida de forma aproximada fazendo-se  $\mu = (1+k)^2/(1+2k)$  e  $\eta \rightarrow 0$ , ou de forma equivalente, fazendo-se  $2\mu = (1+k)^2/(1+2k)$ .

A distribuição Log-normal, dada como uma função de  $m$ , também pode ser aproximada pela distribuição Eta-mi para  $e^{-1} \leq \rho \leq e$ , e para  $\mu = m$  e  $\eta \rightarrow 0$ , e para  $\mu = m/2$  e  $\eta \rightarrow 1$ .

Para um dado valor do parâmetro  $m$  de Nakagami, as curvas da distribuição Kappa-mi estão *sempre* acima da curva de Nakagami-m enquanto as curvas da distribuição Eta-mi encontram-se *sempre* abaixo desta, como se pode observar pela Figura 1.2, onde  $m = 1,25$ . Observa-se também que as duas curvas coincidem entre si na própria curva de Nakagami-m. Essa característica é interessante e prática, pois para um dado conjunto de dados o parâmetro  $m$  é calculado e os dados plotados no plano de desvanecimento. Se os dados estiverem acima da curva de Nakagami-m a melhor distribuição para ajustá-los é a distribuição Kappa-mi, caso contrário a melhor distribuição é a de Eta-mi [14].



**Figura 1.2** Nakagami-m como fronteira entre Kappa-mi e Eta-mi.

#### 1.4 Resumo do capítulo

O presente capítulo buscou apresentar as ferramentas básicas que serão aplicadas na elaboração de um modelo de previsão da intensidade do sinal. O modelo que será proposto abrangerá a análise estatística do desvanecimento rápido do canal de propagação, através da avaliação de qual das distribuições apresentadas melhor se ajustará aos dados medidos.

## CAPÍTULO 2 – MODELO PROPOSTO PARA AMBIENTE *INDOOR*

### 2.1 Introdução

A proposta deste capítulo é criar um modelo que melhor caracterize o ambiente *indoor* escolhido para análise, esse modelo apresentará uma componente estatística que será caracterizada através das FDPs que foram apresentadas no capítulo anterior.

A necessidade de modelar o local em que foram realizadas as medições e no qual será implantado um sistema de Rádio Freqüência (RF) se dá pelo fato de melhor se adequar um projeto às necessidades locais, prevendo uma melhor cobertura e qualidade do sinal.

### 2.2 Ambiente analisado

O ambiente escolhido para estudo foi um *shopping center* da cidade de Belém do Pará, de dimensões consideráveis, com muitos objetos e áreas dispersoras de sinal, que contribuem tanto de maneira positiva quanto negativa na composição do sinal recebido pelo usuário. Como todo grande *shopping center*, possui muitas lojas concentradas, com muitos vidros, que são espalhadores de sinal, corredores amplos, escadas rolantes e escadas comuns, além de elevadores. As perdas de intensidade de sinal em ambientes *indoor* são causadas por paredes, pisos, pessoas, mobílias e grandes objetos de metal. Também existem dentro da área do *shopping*, vários estacionamentos, locais que talvez não sejam considerados tão importantes para o atendimento, mas que são muito visados pelos usuários que

precisam se comunicar. A idéia de atendimento é geral, visto que para o usuário o que importa é ser bem atendido em todos os pontos sem se interessar com a área de cobertura. Portanto, o que se espera em qualquer serviço celular são a cobertura e a qualidade do serviço, aspectos que vão ao encontro das necessidades do usuário. A Figura 2.1 e a Figura 2.2 mostram áreas do *shopping* onde foram realizadas medições.



**Figura 2.1** Área do supermercado do *shopping* onde foram realizadas medições.



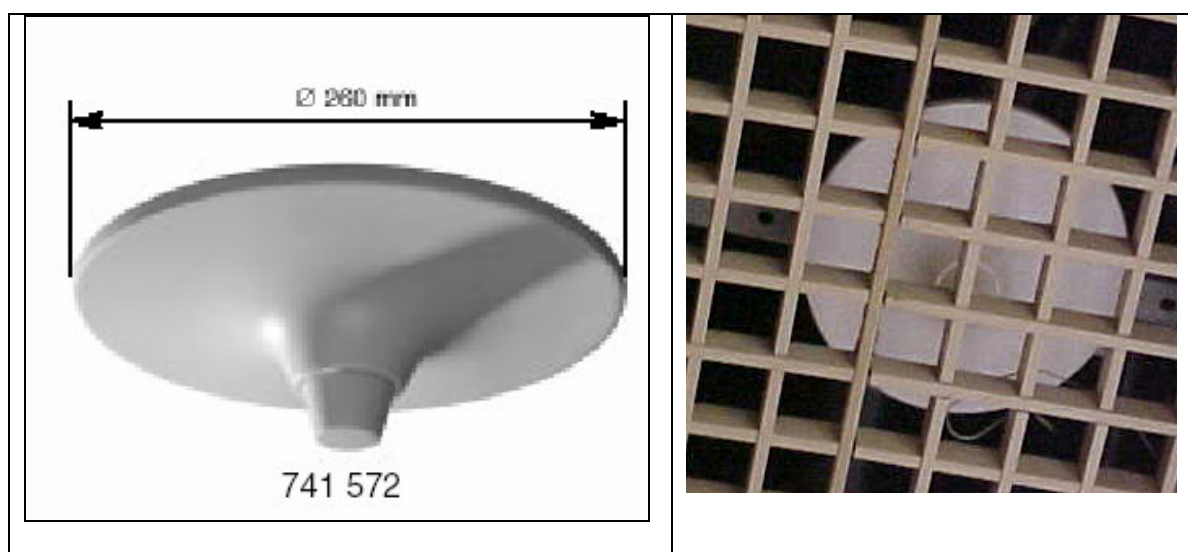
**Figura 2.2** Outra visão do supermercado do *shopping*.

Esse ambiente possui um DAS para um atendimento da área de cobertura interna, que se distribuem em todos os pisos do *shopping*. A fonte transmissora GSM utiliza a frequência de 1800 MHz e a potência de saída ajustada em 41 dBm.

### 2.2.1 Configuração das antenas

Vários fabricantes projetam antenas para uso *indoor*. A principal diferença no projeto de novas antenas é o tamanho. As antenas *indoor* são projetadas para serem tão discretas quanto possíveis, e o tamanho e forma são as principais restrições.

As antenas transmissoras utilizadas no prédio foram do tipo *indoor* omnidirecional e painel, como mostradas nas Figuras 2.3 e 2.4, respectivamente.



**Figura 2.3** Antena omnidirecional usada no *shopping*.

A configuração das antenas para a aplicação *indoor* utilizada nesse prédio é de antenas distribuídas ligadas por uma rede de cabos RF coaxiais.

Com essa configuração, o prédio é dividido dentro de áreas de cobertura atendidas por um DAS que é instalado através do prédio, conforme ilustrado na

Figura 2.5. Para prédios de tamanho e forma retangulares, uma antena omnidirecional da estação base situada centralmente no teto de um andar é a posição recomendada para a antena *indoor* de forma que possa cobrir o piso inteiro. O DAS reduz também o número de estações base [15][16] e possui uma grande faixa de aplicações. Isso pode ser explicado pelas características atrativas da configuração:

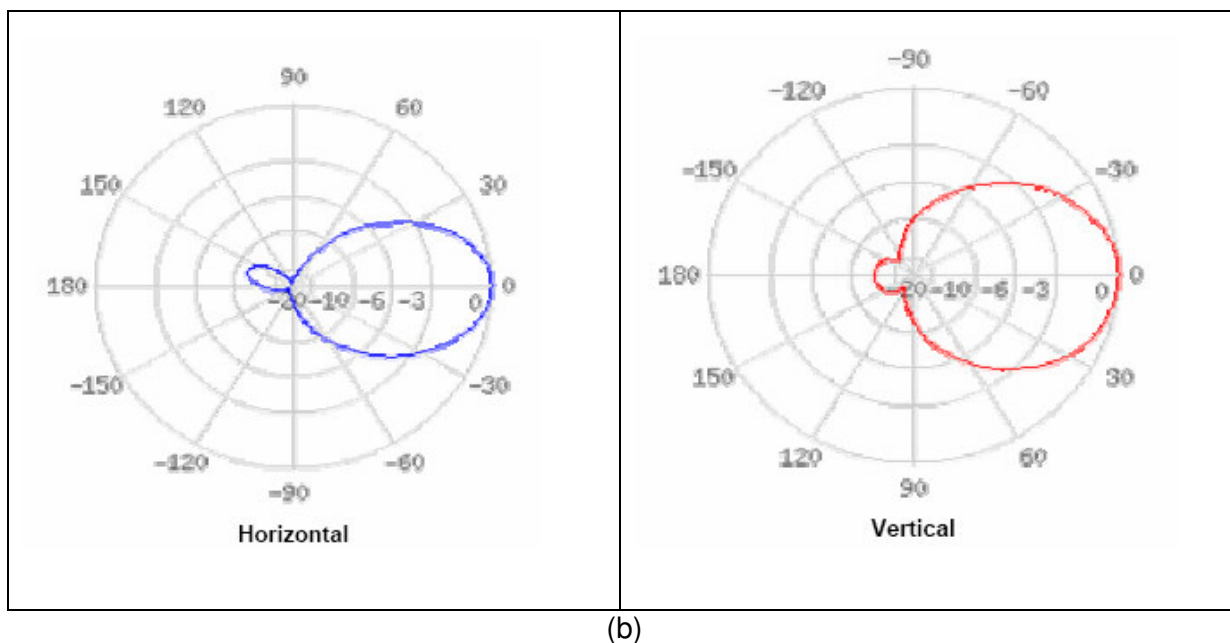
- Baixo custo;
- Flexibilidade no projeto quanto à forma das áreas de cobertura;
- Distribuição da potência que pode ser controlada pelo uso de divisores de potência distribuídos em quantidades diferentes;

- Antenas extras baratas e fáceis de adicionar;
- Instalação oculta;
- Técnica robusta e melhorada.

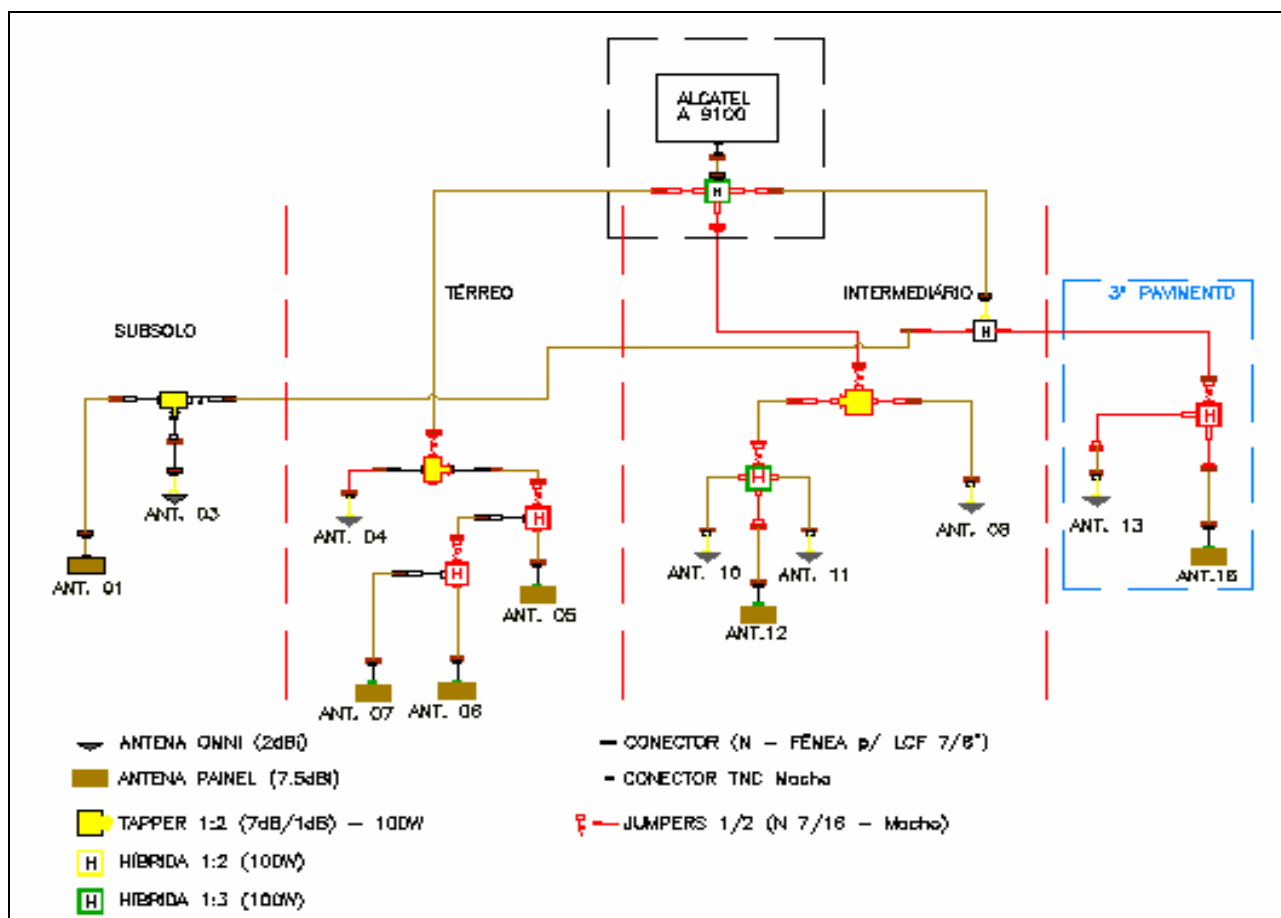


(a)





**Figura 2.4** (a) Antena painel utilizada no *shopping*. (b) Diagrama de irradiação da antena do tipo painel usada no *shopping*.



**Figura 2.5** Diagrama unifilar – Interior do *shopping*.

No DAS é necessário que todas as antenas possam transmitir todos os canais de uma operadora. Isso significa que todas as saídas dos transceptores devem ser combinadas.

Com relação à localização das antenas, geralmente a configuração nominal de projeto pode não ser adequada para o prédio. Razões para isso podem ser no caso em que as localizações sugeridas sejam próximas a locais onde as pessoas sentam ou caminham, caso em que existirão obstáculos deteriorando o diagrama de irradiação ou problemas na montagem das antenas nessas localizações.

Existem regras a considerar quando da escolha da localização dos equipamentos e a distribuição dos cabos alimentadores. Além disso, o proprietário e outras autoridades locais têm uma opinião sobre a localização do equipamento. Ambas as partes devem estar de acordo para o propósito nominal antes da instalação final [8].

Observa-se no ambiente escolhido para o estudo que as antenas omnidirecionais são montadas no teto e as antenas direcionais do tipo painel nas paredes em geral.

### **2.3 Campanha de medições**

Esta seção descreve a campanha de medições no ambiente escolhido, que possui uma Estação Base Transceptora (na sigla em inglês, BTS) interna gerando uma Potência Efetivamente Irradiada (na sigla em inglês, EIRP) de 41 dBm para o sistema irradiante distribuído.

Para realizar a medição utilizou-se o receptor/medidor TEMS *Pocket* para GSM, Figura 2.6, um computador *notebook* que serviu de interface para a aquisição de dados usando o software TEMS *Investigation* GSM 4.0 Ericsson.

O TEMS *Pocket* para GSM é um telefone móvel do fabricante Ericsson com características básicas de teste para interfaces aéreas digitais, como ilustrado na Figura 2.6. Ele pode ser usado para vários propósitos, tais como verificação de interfaces aéreas digitais, operação e manutenção de redes e como um auxílio no planejamento celular e sintonia de rede.

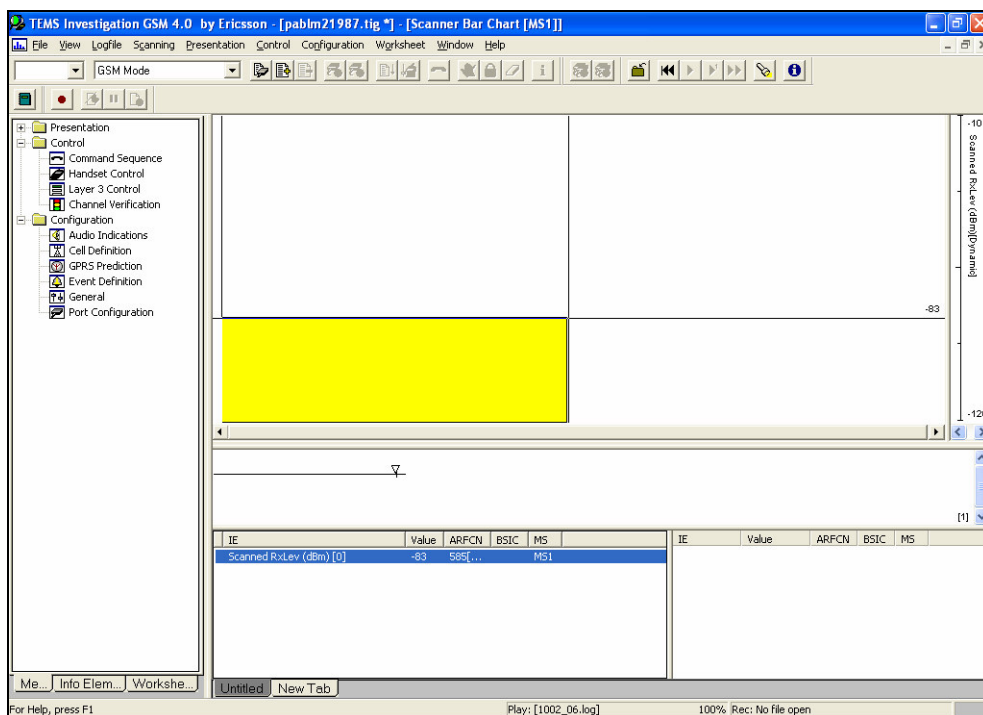


**Figura 2.6** TEMS *Pocket* para GSM (detalhe).

### 2.3.1 Procedimento de medições

É importante notar que no ambiente *indoor*, não há como utilizar o GPS (Sistema de Posicionamento Global), visto que o mesmo opera em ambientes externos com o uso de satélites. Os dados de potência do sinal coletados foram armazenados no *notebook* e os pontos de medição foram marcados na planta baixa (*layout*) do piso em questão.

1. Primeiramente para poder realizar o *walk-test*, foi escolhido o canal 585, com freqüência de 1819,8 MHz, utilizando o modo de Onda Contínua (na sigla em inglês, CW), sem modulação além do que deve ser um canal sem portadoras adjacentes. Esse canal deve ser configurado no modo de varredura no software de aquisição de dados TEMS *Investigation*, cuja tela é mostrada na Figura 2.7.

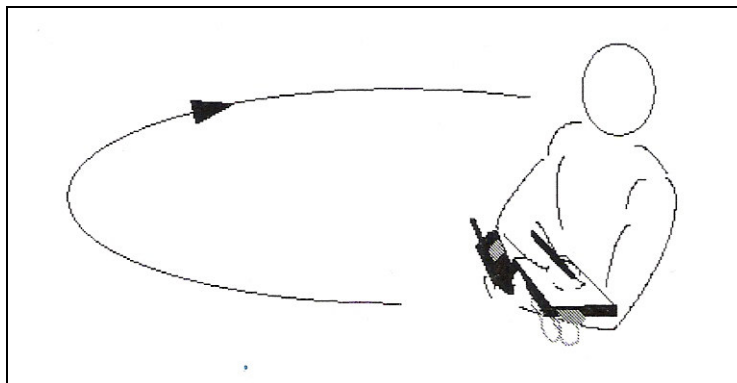


**Figura 2.7** Tela do programa utilizado para a coleta de dados.

2. Após a seleção do canal no *software*, inicia-se a coleta de sinal na portadora escolhida, medindo assim a potência de saída do transmissor usando o equipamento receptor. É importante salientar que apenas o sinal de um canal será coletado.

3. Procurar por bordas de cobertura, distanciando-se da antena.

4. O TEMS deve ser mantido como na Figura 2.6, girando-se em círculos de raio 1 m, como ilustrado na Figura 2.8 [15], para cada 3 m em linha reta da planta.



**Figura 2.8** Procedimento para a realização da medição.

Dentro de cada pequena área, 10.000 medições foram feitas rotacionando uma antena receptora em um plano circular horizontalmente orientado aproximadamente a 1,8 m acima do piso e em uma taxa uniforme, tal que aproximadamente oito revoluções fossem completadas enquanto as 10.000 amostras eram coletadas [15].

No momento da coleta de dados em cada um dos pisos do *shopping*, a referência de cada ponto coletado foi marcada na planta baixa em questão. Posteriormente, essas referências foram agrupadas por piso e organizadas nas plantas em arquivos do *software* AUTOCAD, como ilustradas na Figura 2.9. Cada um dos pontos marcados no respectivo piso representa 10.000 amostras coletadas. Os valores de 22,1 dBm e 17,7 dBm indicam os valores EIRPs dos transmissores localizados nesse piso.

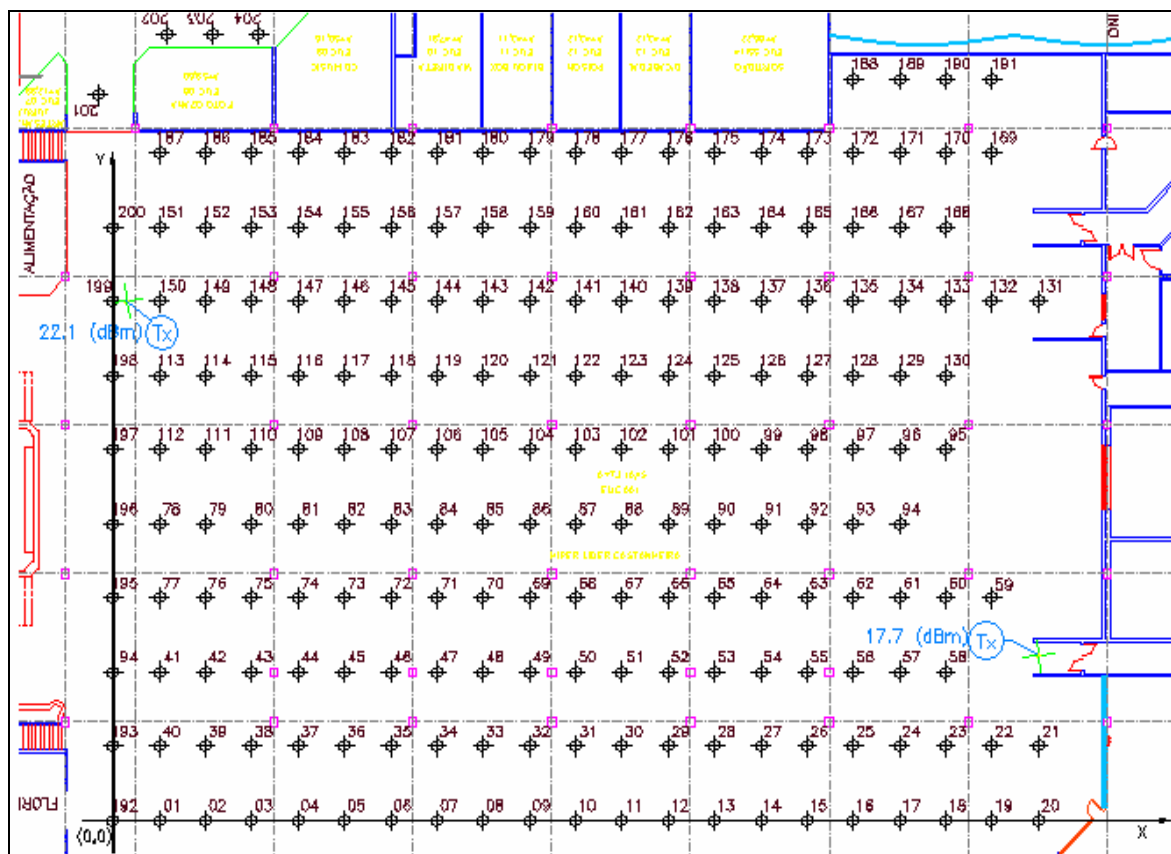


Figura 2.9 Localização dos pontos coletados na planta.

## 2.4 Modelo Proposto

O modelo proposto tem por finalidade buscar a caracterização de um ambiente *indoor* multifontes, com mais de um transmissor. A idéia é compor uma expressão que englobe uma análise estatística da componente de desvanecimento rápido, assim como envolver a quantidade de fontes, já que o ambiente utiliza DAS. Essa análise é importante, já que no caso do local escolhido, um *shopping center*, há a necessidade de várias áreas de coberturas para atender aos diversos pontos do *shopping*.

O modelo proposto é utilizado para calcular a potência recebida e compará-la posteriormente com a potência medida, a fim de avaliar os erros para o propósito de

melhor prever a intensidade de sinal, servindo de ferramenta de apoio aos projetistas de RF ao implementar um novo sistema celular assim como otimizar os já existentes.

Os elementos para compor o modelo são os valores das potências EIRPs, calculadas através da equação  $EIRP = P_t + G_t - A_{comb} - A_{cab} - A_{conec}$ , em dBm, sendo que  $P_t$  é a potência de transmissão (dBm),  $G_t$  é o ganho da antena de transmissão (dBi),  $A_{comb}$  é a perda no combinador (dB),  $A_{cab}$  é a perda no cabo (dB) e  $A_{conec}$  é a perda nos conectores (dB), de cada uma das fontes transmissoras. A proposta do modelo é inserir parâmetros que caracterizam o meio, como os apresentados no item 1.2.3, que trata dos fenômenos de propagação, tais como a perda de percurso e aspectos estatísticos de desvanecimento de sinal, através da caracterização da parcela de multipercurso do sinal, o desvanecimento rápido.

A atenuação do sinal transmitido é representada através do termo exponencial, que agrega o termo  $k$ , variando com a distância  $d$ . Os termos  $k$  e  $d$ , representam a constante de atenuação e a distância referente à radial em questão.

O termo logaritmo precedido da constante  $c$  representa a inclinação da curva de intensidade de sinal com relação à distância  $d$ , referente à radial em questão, indicando uma maior ou menor perda no percurso devido aos obstáculos.

Os valores de  $k$  e  $c$  são obtidos através do uso do algoritmo simplex de Nelder-Mead, apresentado no ANEXO, através do método de procura direta.

A formulação do modelo é apresentada na Equação (2.1).

$$P_r = X\eta, \mu - PL_0 - \frac{P_{TX}^1}{F_{norm}} \cdot e^{-k_1 \cdot d_1} - c_1 \cdot \log_{10}(d_1 / d_0) - \sum_{i=2}^N \left( \frac{P_{TX}^i}{F_{norm}} \cdot e^{-k_i \cdot d_i} + c_i \cdot \log_{10}(d_i / d_0) \right) \cdot (i-1) \quad (\text{dBm}) \quad (2.1)$$

Sendo que  $X_{\eta,\mu}$  é a variável aleatória caracterizada estatisticamente pela FDP Eta-mi, com desvanecimento rápido. Obtida após a avaliação dos dados com as FDPs utilizadas no trabalho.

O cálculo da variável aleatória  $X_{\eta,\mu}$  consiste em separar a componente de desvanecimento rápido, que será acrescentada ao modelo. Isso é feito através de um “janelamento” que separa a componente de desvanecimento lento da componente de desvanecimento rápido.

Além de se obter a variável aleatória para ser adicionada ao modelo, foi verificada a caracterização do ambiente, através de distribuições estatísticas. Essa caracterização se faz necessária, pois assim é possível avaliar o desvanecimento do sinal no canal. O desvanecimento, conforme já mencionado, deve ser bem caracterizado para que seja possível um melhor ajuste no momento do projeto.

Na Equação (2.1)  $PL_0$  é a perda no espaço livre dada por:

$$PL_0(dB) = 20 \cdot \log_{10}(f_{MHz}) + 20 \cdot \log_{10}(d_0 / 1000) + 32,44$$

Sendo que  $d_0$  é a distância de referência em km,  $f$  é a frequência do sinal em MHz,  $P_{Tx}^i$  é o valor da potência do transmissor  $i$ , ( $i = 1, \dots, N$ ), e  $F_{norm}$  é o fator de normalização (adimensional).

O fator de normalização  $F_{norm}$  é utilizado para normalizar a potência do transmissor de referência, normalmente se escolhe o transmissor com maior valor de potência transmitida. Considerando que os demais transmissores, no sistema multifontes tenham potências diferentes.

Os termos  $k_i$  e  $c_i$  na Equação (2.1) representam respectivamente a constante de atenuação específica na distância  $d_i$ , ( $i = 1, \dots, N$ ) e a constante de



ajuste de inclinação da curva com relação à  $d_i$ , ( $i = 1, \dots, N$ ), sendo que  $i$  é índice do número de transmissores e  $N$  indica a quantidade máxima de transmissores.

Os parâmetros  $k_i$  e  $c_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ) são calculados através das seguintes equações:

$$k_i = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot \lambda}, \text{ seu valor dado em (1/m)}, \quad (2.2)$$

$$c_i = -40 \cdot \beta \quad (2.3)$$

Sendo que  $\beta$  (dBm/m) é a inclinação da curva dos dados medidos, e  $\lambda$  é o comprimento de onda.

O modelo será avaliado para dois ambientes no interior do *shopping*, uma praça de alimentação, sendo atendida por um transmissor e o outro local é um supermercado que é atendido por duas fontes transmissoras. Sendo assim, a análise será apresentada em dois casos, como segue abaixo a descrição:

**Caso 1:** Um transmissor ( $i = 1$ )

$$P_r = X\eta, \mu - PL_0 - \frac{P_{Tx}^1}{F_{norm}} \cdot e^{-k_1 \cdot d_1} - c_1 \cdot \log_{10}(d_1 / d_0) \quad (2.4)$$

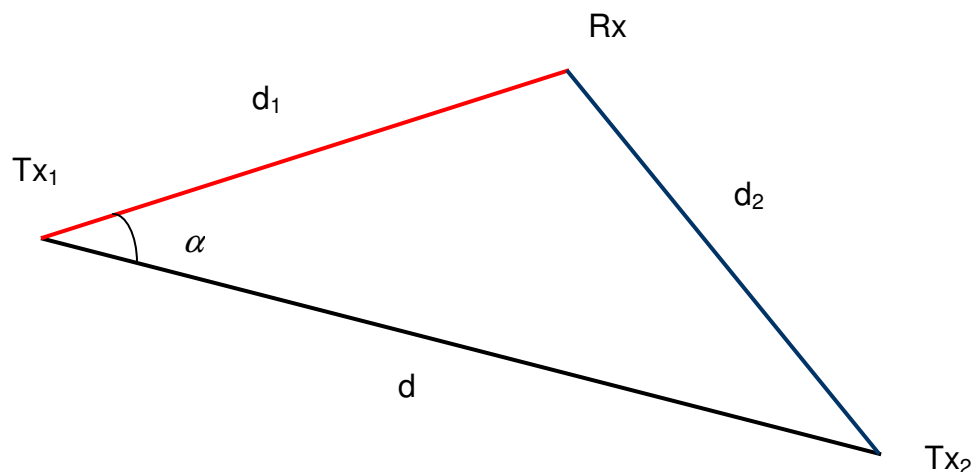
**Caso 2:** Dois transmissores ( $i = 2$ )

$$P_r = X\eta, \mu - PL_0 - \frac{P_{Tx}^1}{F_{norm}} \cdot e^{-k_1 \cdot d_1} - c_1 \cdot \log_{10}(d_1 / d_0) - \frac{P_{Tx}^2}{F_{norm}} \cdot e^{-k_2 \cdot d_2} - c_2 \cdot \log_{10}(d_2 / d_0) \quad (2.5)$$

O valor da distância  $d_2$ , ilustrada na Figura 2.10, é calculado como segue:

$$d_2 = \sqrt{(d_1^2 + d^2 - 2 \cdot d_1 \cdot d \cdot \cos(\alpha))}$$

Sendo que  $d$  é a distância do  $Tx^1$  até o  $Tx^2$  e  $\alpha$  é o ângulo entre a distância  $d$  e a distância  $d_1$  da radial escolhida, de acordo com a Figura 2.10.



**Figura 2.10** Ilustração de como obter a distância  $d_2$  que se refere à distância do  $Tx_2$  até o ponto do receptor na radial escolhida na distância  $d_1$ .

## 2.5 Resumo do capítulo

O capítulo apresentado tratou de todas as etapas para a criação do modelo proposto, como o ambiente analisado, a campanha e procedimentos de medições. Além dessas etapas, por fim, apresentou-se o modelo proposto com o tratamento para o caso de dois transmissores e como caso particular para um transmissor.

## CAPÍTULO 3 - RESULTADOS OBTIDOS

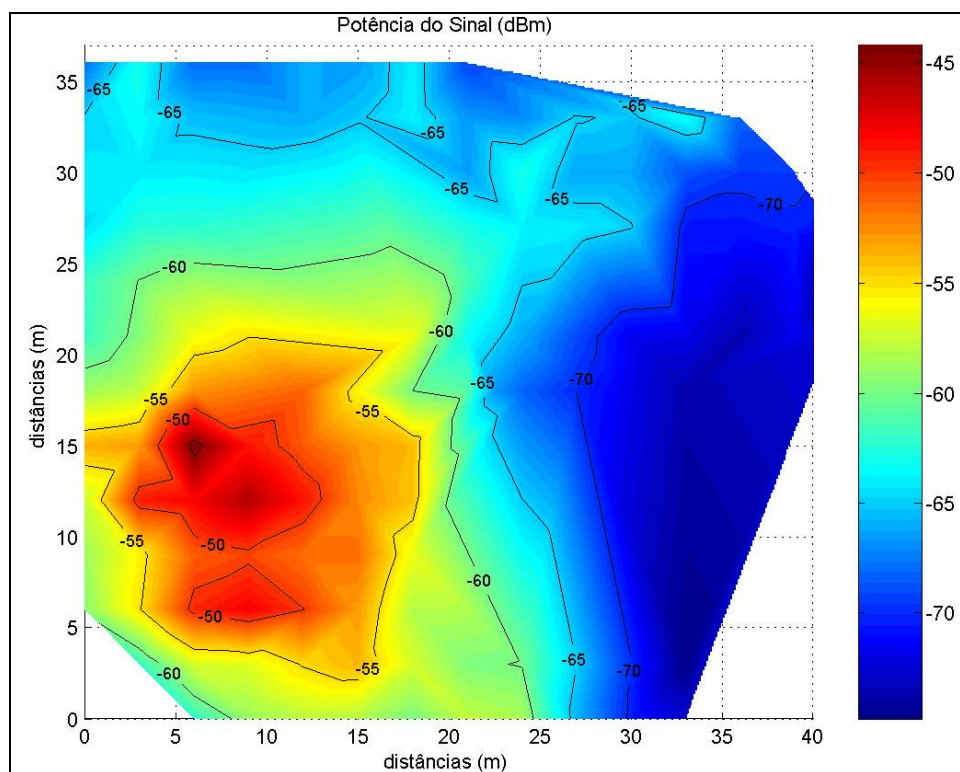
Como apresentado no capítulo anterior, que tratou da elaboração e apresentação do modelo proposto, o mesmo será avaliado para os seguintes casos:

### 3.1 Caso 1: Ambiente com apenas um transmissor

O ambiente apresentado possui apenas um transmissor, é um local aberto, onde funciona uma praça de alimentação, com várias lojas, mesas, e que apresenta intenso movimento de pessoas. Além desses obstáculos, possui um agravante na análise do sinal, visto que possui uma escada rolante como acesso, com material dispersor de sinal. A escada no meio do piso ocasiona vários pontos de dispersão do sinal, provocando múltiplos percursos do sinal.

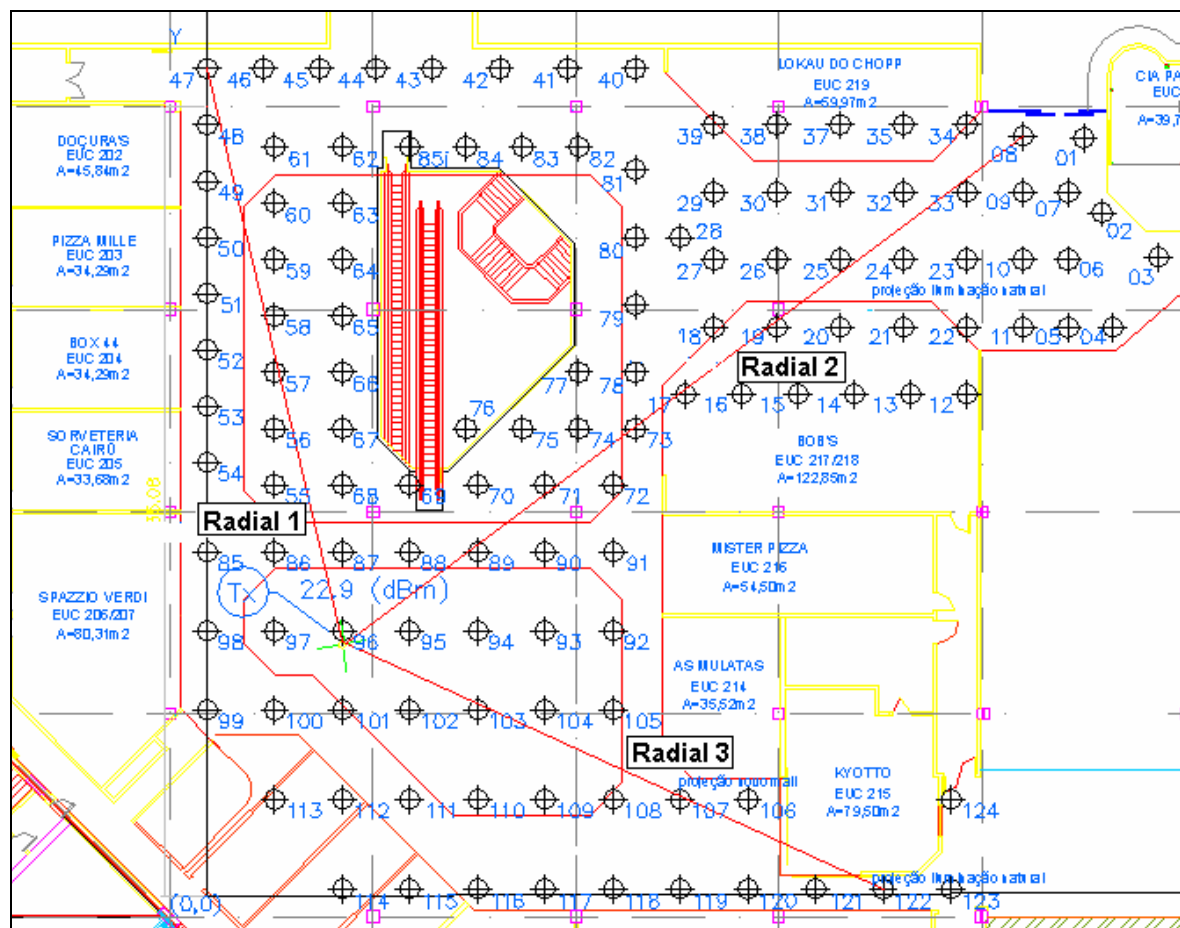
#### **Local: PRAÇA DE ALIMENTAÇÃO**

A Figura 3.1 ilustra a intensidade de sinal, referente ao local em análise, neste caso a praça de alimentação. De acordo com as cores em legenda, observa-se que há uma concentração de sinal mais intenso, que está destacado pela cor vermelha. Esse local apresenta apenas um transmissor para o atendimento. Esse transmissor é uma antena omnidirecional, como mostrado na Figura 2.3. O mesmo estava irradiando no canal de tecnologia GSM 585, que corresponde à frequência de 1819,8 MHz, obtida através da fórmula  $f_{dl} = 0,2 \cdot (Canal - 512) + 1805,2$ , que é a frequência de *downlink* do sinal, do sentido transmissor para o receptor. O transmissor está indicado na Figura 3.2 com uma cruz verde de onde partem as radiais.



**Figura 3.1** Gráfico de contorno de intensidade de sinal na praça de alimentação.

Para uma melhor análise do ambiente o local de medição foi avaliado em radiais partindo direto do transmissor. Neste caso, foram escolhidas três radiais para o tratamento, conforme ilustra a Figura 3.2. Os pontos indicados na planta do piso da praça de alimentação (que está ilustrada na Figura 3.2) e que vão de 1 a 124 representam os pontos de dados, no caso 10.000 amostras coletadas de intensidade de sinal em cada ponto através do armazenamento das variações do sinal em arquivos do *software* TEMS *Investigation*. Convém ressaltar que as medidas coletadas em cada ponto, são composições das emissões de cada antena, observando-se para o caso de apenas uma fonte que o sinal coletado indica o sinal que irradia do transmissor que atende o local.



**Figura 3.2** Praça de alimentação dividida em radiais.

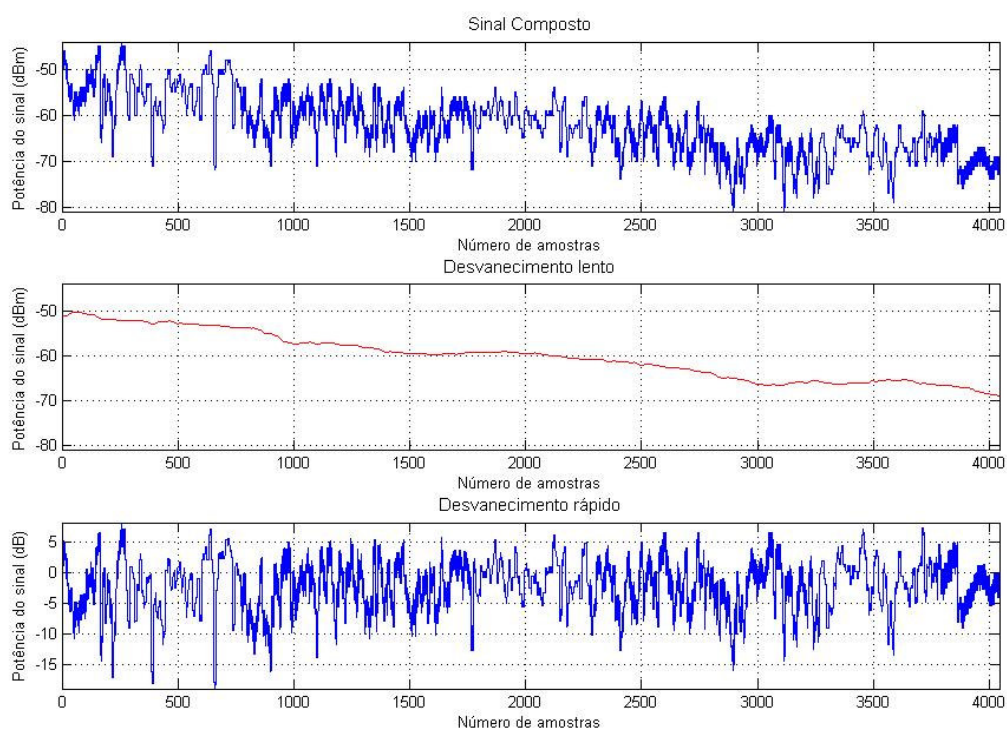
### 3.1.1 Avaliação da Radial 1

1) Separação da componente de desvanecimento rápido que será a variável aleatória que compõe o modelo proposto. De acordo com a Figura 3.3, observa-se a separação das componentes de desvanecimento lento e rápido. Os dados medidos apresentaram um valor médio de -57,1315 dB. Os dados de entrada para o cálculo do gráfico são os valores de potência recebida relacionada com o número de amostras do sinal.

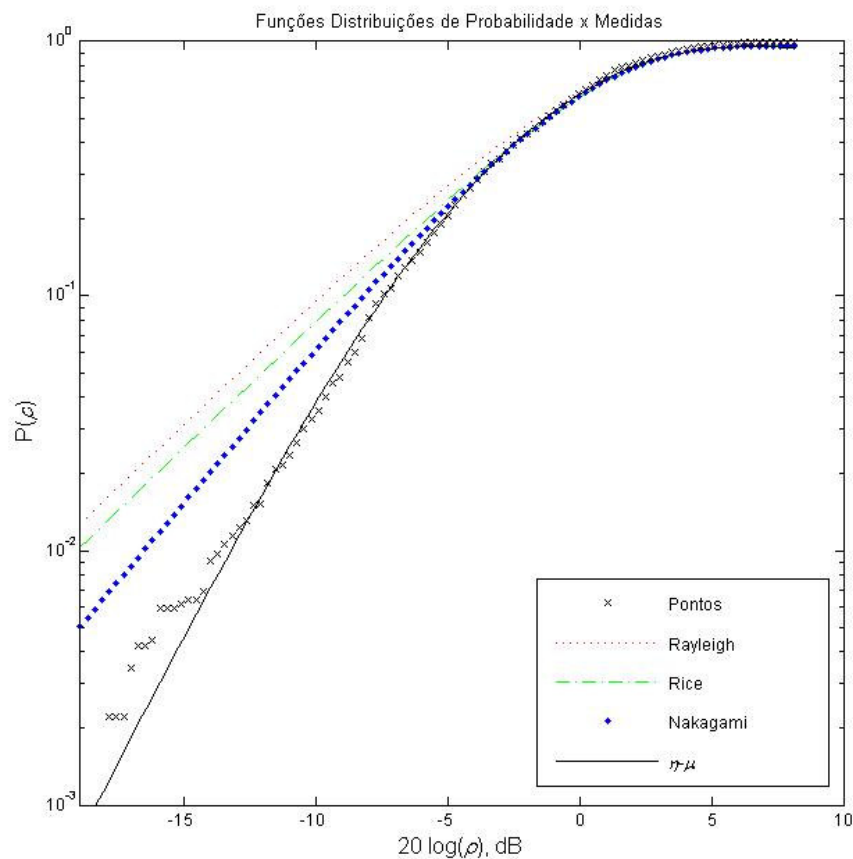
A separação da componente de desvanecimento rápido, que será acrescentada ao modelo é feita através de um “janelamento” que separa a

componente de desvanecimento lento da componente de desvanecimento rápido. Essa janela é utilizada para delimitar uma parcela do sinal observando assim a variação do sinal, como a parcela de desvanecimento lento e rápido.

2) Com a componente de desvanecimento rápido, obtida resultante do cálculo através do gráfico da Figura 3.3, será calculada a FDP que melhor se ajusta aos dados da referida radial, conforme é mostrado na Figura 3.4.



**Figura 3.3** Desvanecimento lento e rápido – Radial 1.



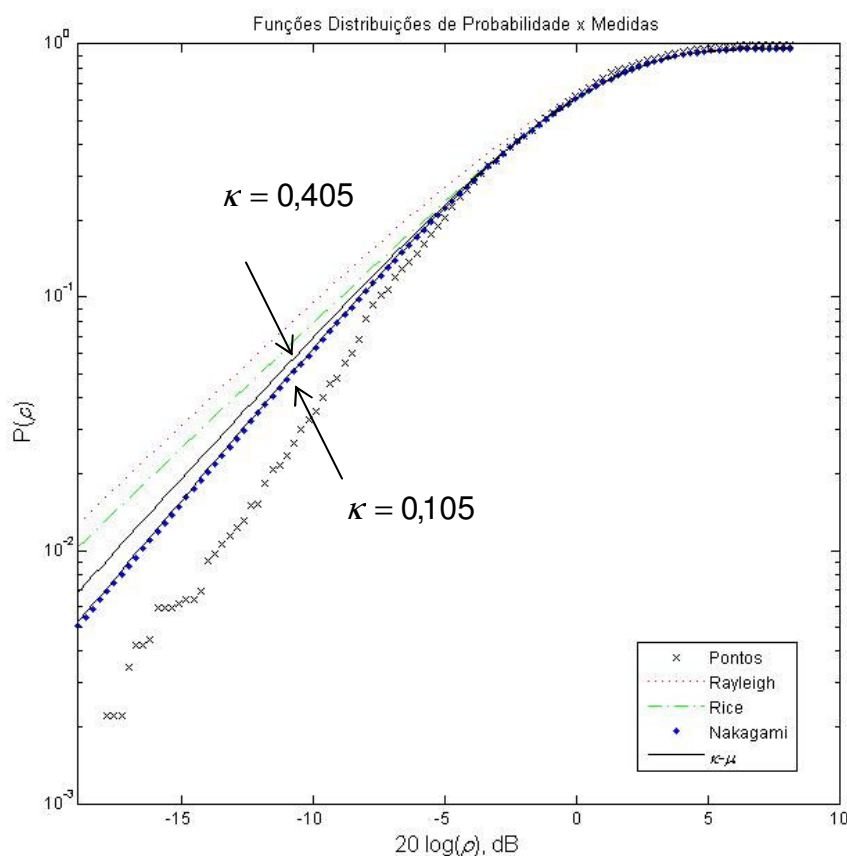
**Figura 3.4** Gráfico de ajuste dos dados pelas FDPs – Radial 1.

A Tabela 3.1 apresenta os resultados do teste do qui-quadrado para todas as FDPs utilizadas no trabalho, avaliando a componente de desvanecimento rápido. Neste caso a FDP que melhor se ajusta aos dados medidos é a de Eta-mi, com os seguintes parâmetros,  $\eta = 0,105$ ,  $m = 1,2508$  e  $\mu = 1,0357$ . Para o cálculo utilizou-se uma amostra de 100 pontos para verificação.

**Tabela 3.1** Resultado do teste do qui-quadrado ( $\chi^2$ ) – Radial 1.

Rayleigh	Rice	Nakagami	Eta-mi	Kappa-mi
137,7410	48,4474	37,2745	5,4659	40,7618

Como mostrado na Figura 1.2 (que utiliza a FDP Kappa-mi e Eta-mi) observa-se que se os dados ficarem abaixo da curva da FDP de Nakagami, a distribuição Eta-mi deve ser utilizada, já que pode melhor caracterizar os dados. Como em todas as radiais subseqüentes os dados ficaram abaixo da curva de Nakagami, portanto, a análise se concentrará apenas no cálculo da FDP Eta-mi. Suprimindo os resultados de Kappa-mi. Abaixo a Figura 3.5 demonstra o ajuste pela FDP Kappa-mi. A Tabela 3.1 apresenta o resultado do teste do qui-quadrado para um valor de  $\kappa = 0,105$ , e para o valor de  $\kappa = 0,405$ , o teste do qui-quadrado resulta em 57,4512.



**Figura 3.5** Gráfico de ajuste dos dados pelas FDPs, ilustrando a de Kappa-mi - Radial 1.

3) Com os dados da variável aleatória, calculou-se o modelo, através da equação:



$$P_r = X\eta, \mu - PL_0 - \frac{P_{Tx}^1}{F_{norm}} \cdot e^{-k_1 \cdot d_1} - c_1 \cdot \log_{10}(d_1 / d_0)$$

Os valores de  $k_1$  e  $c_1$  são dados pelas Equações (2.2) e (2.3), e continuarão os mesmos para as outras radiais, que serão reescritas abaixo:

$$k_i = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot \lambda}$$

$$c_i = -40 \cdot \beta$$

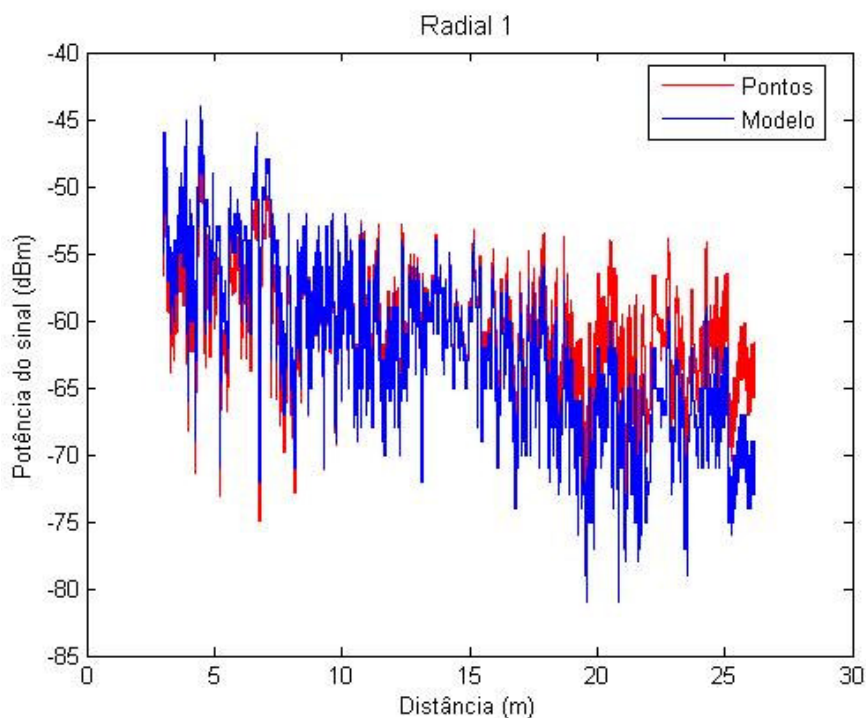
O valor de  $\beta = -0,236$  dBm/m e representa a inclinação da curva dos dados medidos e será o mesmo para as outras radiais visto que representa o ambiente analisado.

Para validar o modelo proposto foram calculados os parâmetros abaixo descritos. A validação consiste em calcular o modelo, com todos os parâmetros definidos e comparar com os dados medidos na campanha de medições, dessa comparação são calculados os erros entre os valores de intensidade de sinal do modelo e as medidas, relacionados com a distância referente à radial em questão, que tem ponto de partida na localização do transmissor. A Tabela 3.2 mostra os valores utilizados para o cálculo do modelo, aplicados à Radial 1.

**Tabela 3.2** Dados do modelo proposto para a Radial 1.

$PL_0$ (dB)	$P_{Tx}^1$ (dBm)	$F_{norm}$	$k_1$	$c_1$	$d_0$ (m)
57,6405	22,9	22,9	4,29	9,44	10

A Figura 3.6 apresenta o resultado da comparação entre o modelo proposto e os dados medidos, referentes à potência recebida.



**Figura 3.6** Gráfico dos dados medidos em comparação ao modelo proposto – Radial 1.

Na Tabela 3.3 são apresentados os erros do modelo, e observa-se que são bastante baixos conseguindo assim ajustar-se bem aos dados medidos, como ilustrado na Figura 3.6.

**Tabela 3.3** Erros do modelo proposto – Radial 1.

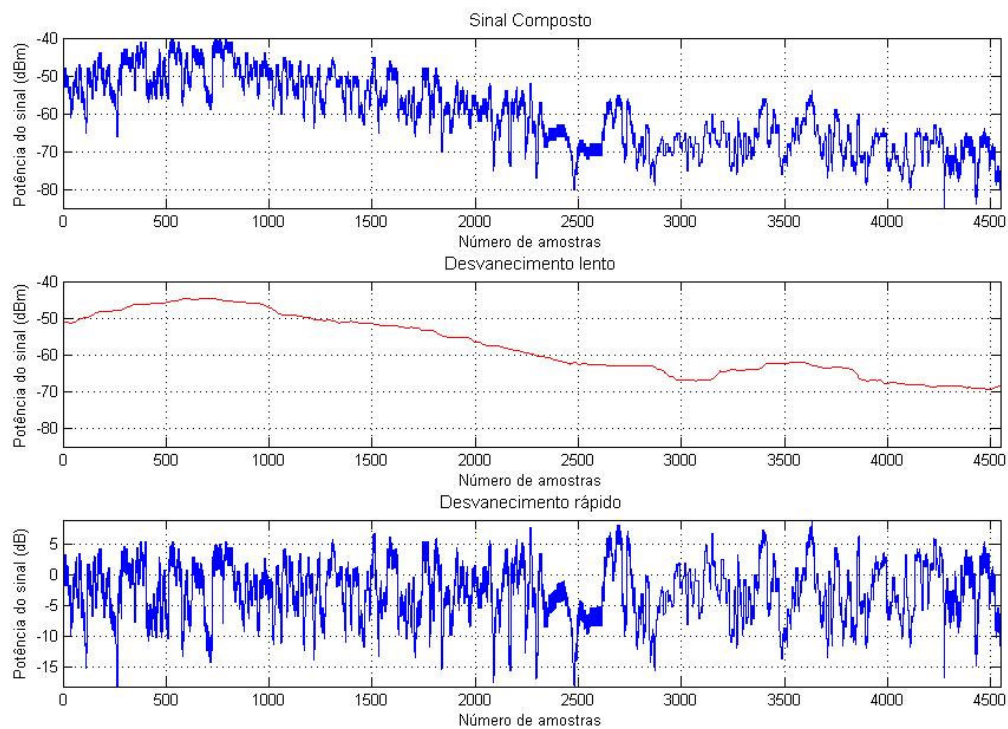
Radial 1	Erro absoluto (dB)	Desvio padrão (dB)	Erro rms (dB)
Modelo	2,6706	1,9503	3,3070

### 3.1.2 Avaliação da Radial 2

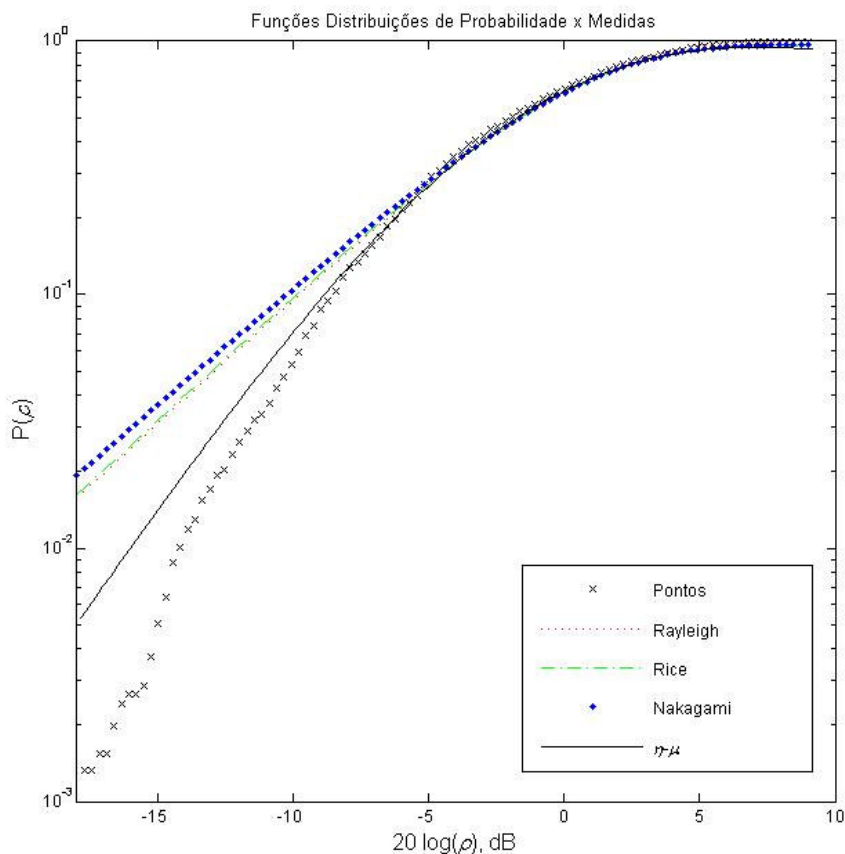
1) Separação da componente de desvanecimento rápido que será a variável aleatória que compõe o modelo proposto. De acordo com a Figura 3.7, observa-se a

separação das componentes de desvanecimento lento e rápido. Os dados medidos apresentaram um valor médio de -51,5484 dB.

2) Com a componente de desvanecimento rápido será calculada a FDP que melhor se ajusta aos dados da referida radial, conforme é mostrado na Figura 3.8.



**Figura 3.7** Desvanecimento lento e rápido – Radial 2.



**Figura 3.8** Gráfico de ajuste dos dados pelas FDPs – Radial 2.

A Tabela 3.4 apresenta os resultados do teste do qui-quadrado para as FDPs utilizadas no trabalho, avaliando a componente de desvanecimento rápido. Neste caso a FDP que melhor se ajusta aos dados medidos é a Eta-mi, com os seguintes parâmetros,  $\eta = 0,105$ ,  $m = 0,94178$  e  $\mu = 0,7798$ . Para o cálculo utilizou-se uma amostra de 100 pontos para verificação.

**Tabela 3.4** Resultado do teste do qui-quadrado ( $\chi^2$ ) – Radial 2.

<b>Rayleigh</b>	<b>Rice</b>	<b>Nakagami</b>	<b>Eta-mi</b>
69,8842	77,1530	95,0820	22,5642

3) Com os dados da variável aleatória, calculou-se o modelo, através da equação:

$$P_r = X\eta, \mu - PL_0 - \frac{P_{Tx}^1}{F_{norm}} \cdot e^{-k_1 \cdot d_1} - c_1 \cdot \log_{10}(d_1 / d_0)$$

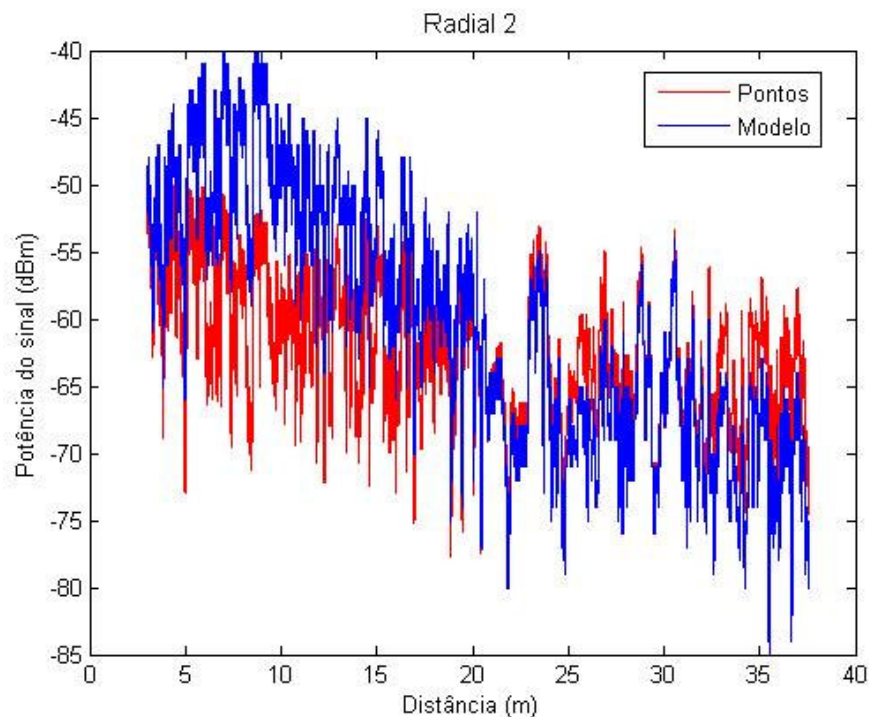
Os valores de  $k_1$  e  $c_1$  são dados pelas Equações (2.2) e (2.3). O valor de  $\beta = -0,236$  dBm/m.

A Tabela 3.5 mostra os valores utilizados para o cálculo do modelo, aplicados à Radial 2.

**Tabela 3.5** Dados do modelo proposto para a Radial 2.

$PL_0$ (dB)	$P_{Tx}^1$ (dBm)	$F_{norm}$	$k_1$	$c_1$	$d_0$ (m)
57,6405	22,9	22,9	4,29	9,44	10

A Figura 3.9 apresenta o resultado da comparação entre o modelo proposto e os dados medidos, referentes à potência recebida.



**Figura 3.9** Gráfico dos dados medidos em comparação ao modelo proposto – Radial 2.

Na Tabela 3.6 são apresentados os erros do modelo, e observa-se que são bastante baixos e conseguem se ajustar aos dados medidos. Apesar desta radial passar próximo a escada rolante apresentando assim muitos pontos de dispersão do sinal.

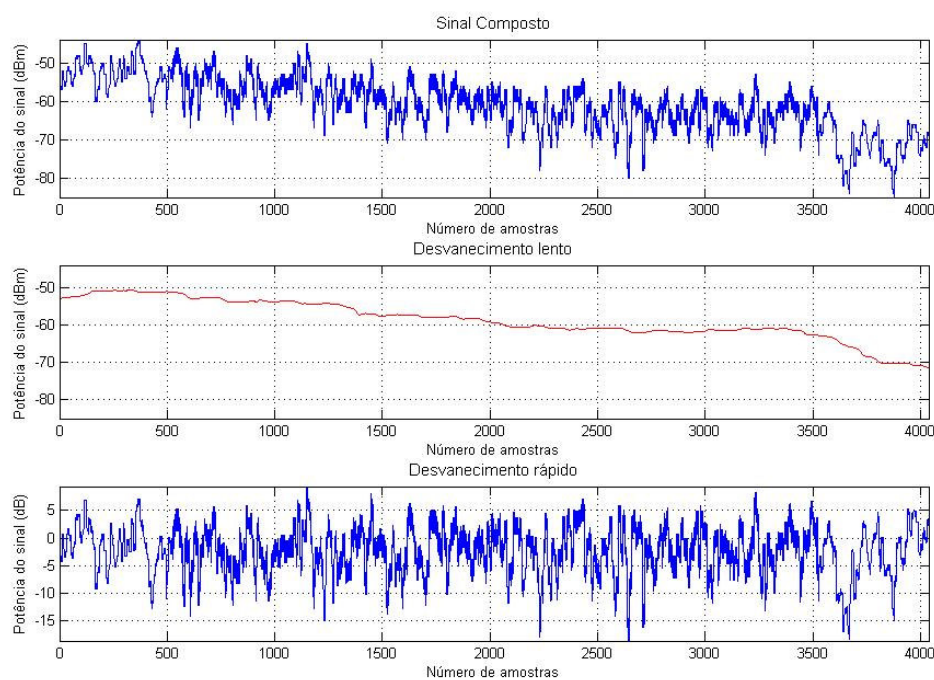
**Tabela 3.6** Erros do modelo proposto – Radial 2.

Radial 2	Erro absoluto (dB)	Desvio padrão (dB)	Erro rms (dB)
<b>Modelo</b>	5,2241	3,5104	6,2939

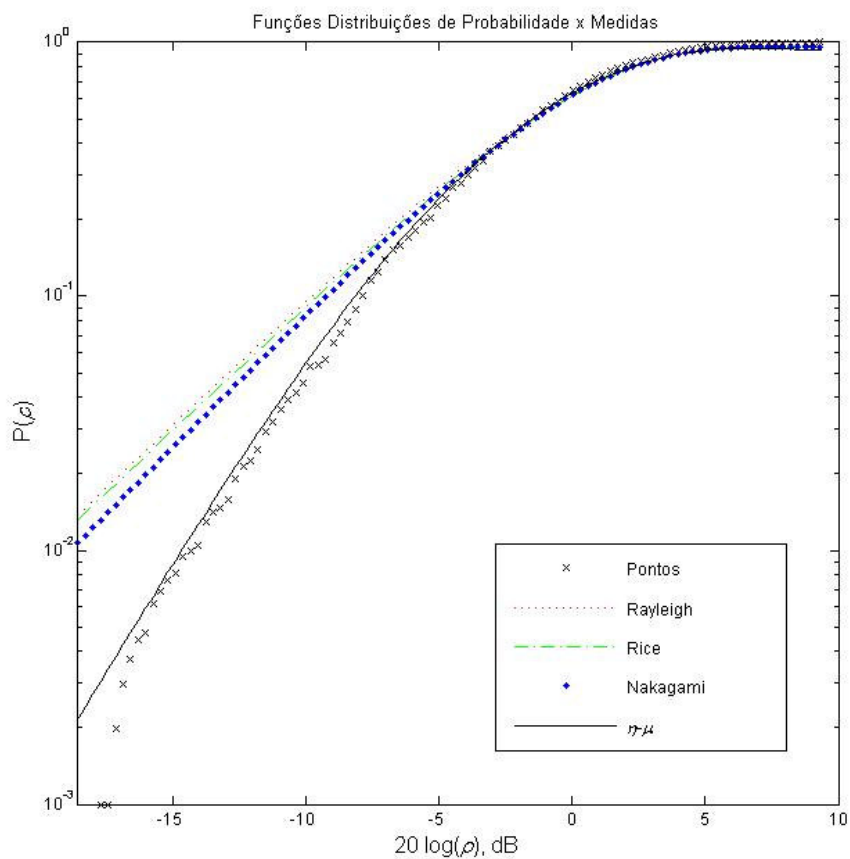
### 3.1.3 Avaliação da Radial 3

1) Separação da componente de desvanecimento rápido. De acordo com a Figura 3.10, observa-se a separação das componentes de desvanecimento lento e rápido. Os dados medidos apresentaram um valor médio de -56,0179 dB.

2) Com a componente de desvanecimento rápido será calculada a FDP que melhor se ajusta aos dados da referida radial, conforme é mostrado na Figura 3.11.



**Figura 3.10** Desvanecimento lento e rápido – Radial 3.



**Figura 3.11** Gráfico de ajuste dos dados pelas FDPs – Radial 3.

A Tabela 3.7 apresenta os resultados do teste do qui-quadrado para todas as FDPs. Neste caso a que melhor se ajusta aos dados medidos é a FDP Eta-mi, com os seguintes parâmetros,  $\eta = 0,105$ ,  $m = 1,0701$  e  $\mu = 0,8860$ . Para o cálculo utilizou-se uma amostra de 100 pontos para verificação.

**Tabela 3.7** Resultado do teste do qui-quadrado ( $\chi^2$ ) – Radial 3.

Rayleigh	Rice	Nakagami	Eta-mi
88,4566	37,9396	61,6953	9,4339

3) Com os dados da variável aleatória, calculou-se o modelo, através da equação:

$$P_r = X\eta, \mu - PL_0 - \frac{P_{Tx}^1}{F_{norm}} \cdot e^{-k_1 \cdot d_1} - c_1 \cdot \log_{10}(d_1 / d_0)$$

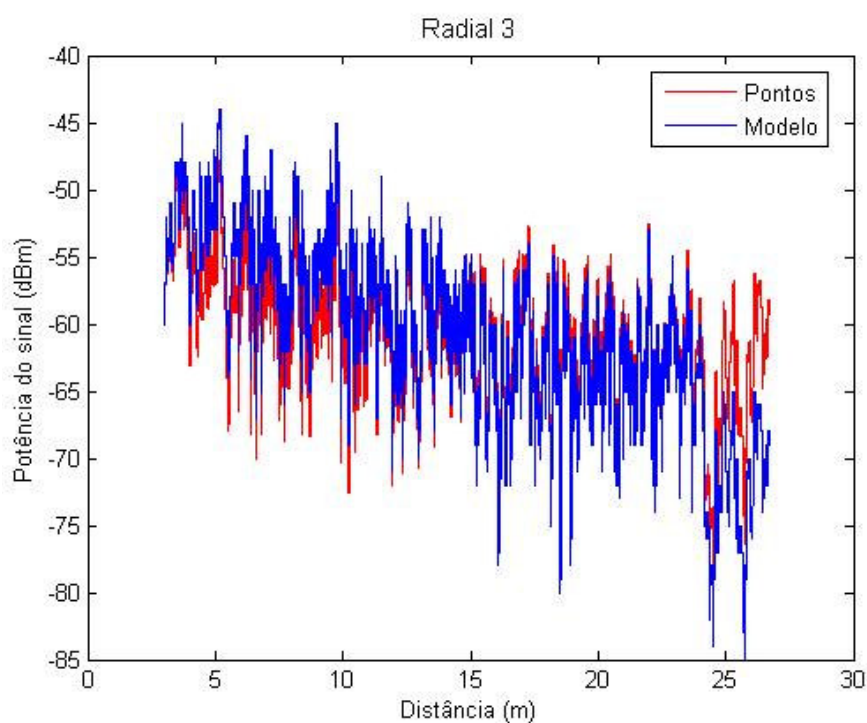
Os valores de  $k_1$  e  $c_1$  são dados pelas equações (2.2) e (2.3) e o valor de  $\beta = -0,236$  dBm/m.

A Tabela 3.8 mostra os valores utilizados para o cálculo do modelo, aplicados à Radial 3.

**Tabela 3.8** Dados do modelo proposto para a Radial 3.

$PL_0$ (dB)	$P_{Tx}^1$ (dBm)	$F_{norm}$	$k_1$	$c_1$	$d_0$ (m)
57,6405	22,9	22,9	4,29	9,44	10

A Figura 3.12 apresenta o resultado da comparação entre o modelo proposto e os dados medidos, referentes à potência recebida.



**Figura 3.12** Gráfico dos dados medidos em comparação ao modelo proposto – Radial 3.



Na Tabela 3.9 são apresentados os erros do modelo proposto, e observa-se mais uma vez que são baixos ajustando-se bem aos dados medidos.

**Tabela 3.9** - Erros do modelo proposto – Radial 3.

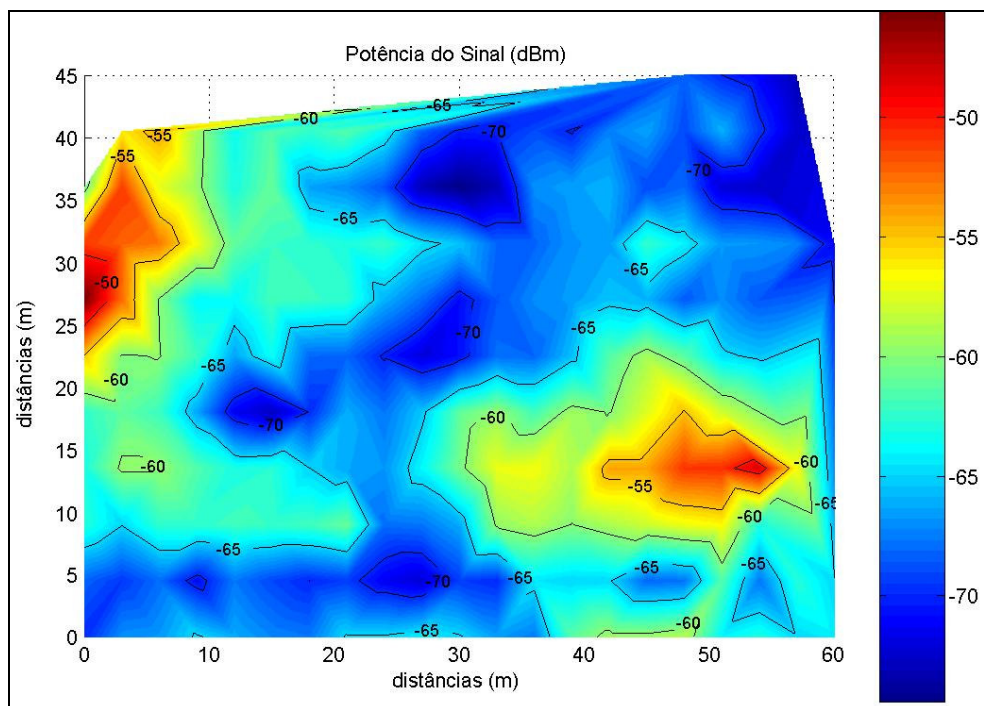
<b>Radial 3</b>	<b>Erro absoluto (dB)</b>	<b>Desvio padrão (dB)</b>	<b>Erro rms (dB)</b>
<b>Modelo</b>	2,3946	2,2003	3,2519

### **3.2 Caso 2: Ambiente com dois transmissores**

O ambiente apresentado possui dois transmissores, é um local aberto, onde funciona um supermercado, com vários obstáculos, representados por pessoas, prateleiras, produtos e máquinas. Os mesmos procedimentos de cálculos e parâmetros adotados para o Caso 1 serão adotados para este caso.

#### **Local: SUPERMERCADO**

A Figura 3.13 ilustra a intensidade de sinal, referente ao local em análise. De acordo com as cores em legenda, observa-se que há uma concentração de sinal mais intenso, destacado pela cor vermelha. Este local apresenta dois transmissores. Esses transmissores são antenas painéis, cujo diagrama de irradiação está na Figura 2.4.



**Figura 3.13** Gráfico de contorno de intensidade de sinal no supermercado.

Para uma melhor análise do ambiente o local de medição foi avaliado em radiais partindo diretamente do transmissor. Neste caso, foram escolhidas quatro radiais para o tratamento, conforme ilustra a Figura 3.14.

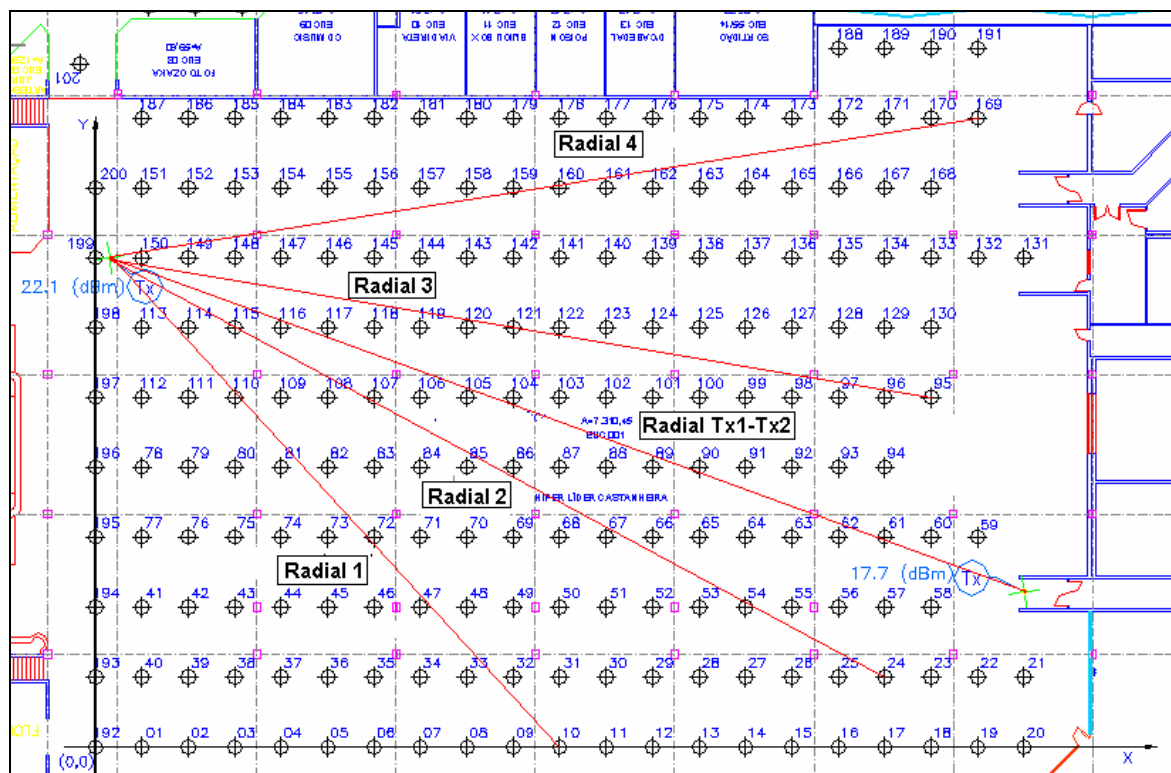
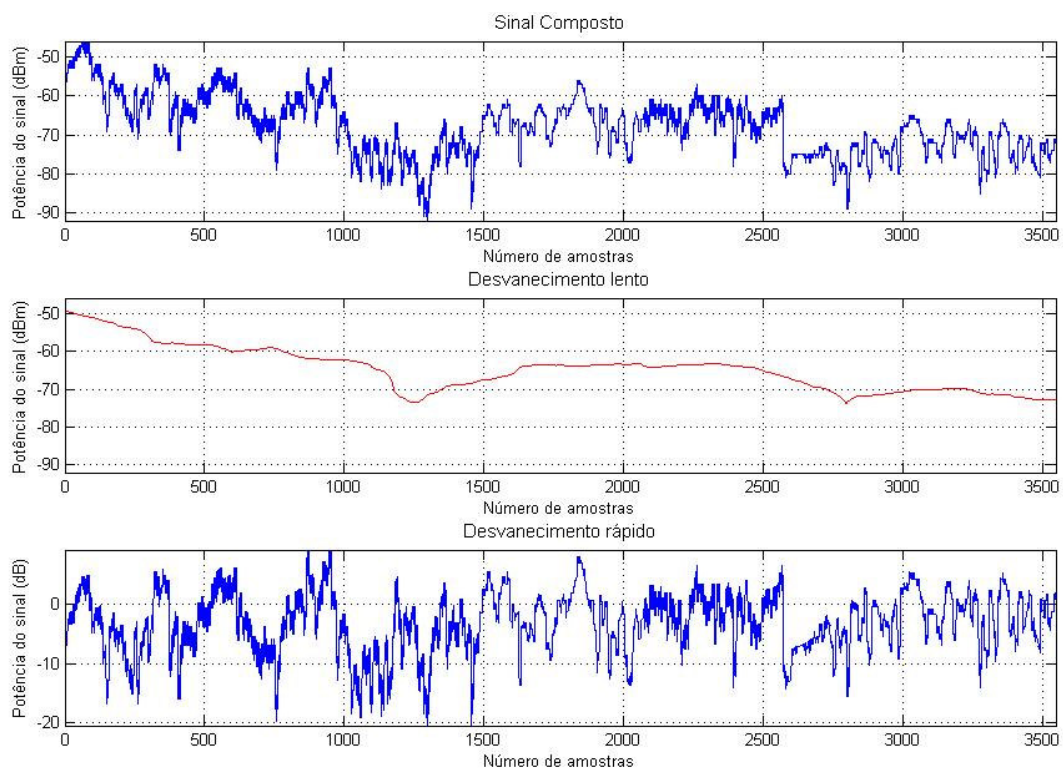


Figura 3.14 Supermercado dividido em radiais.

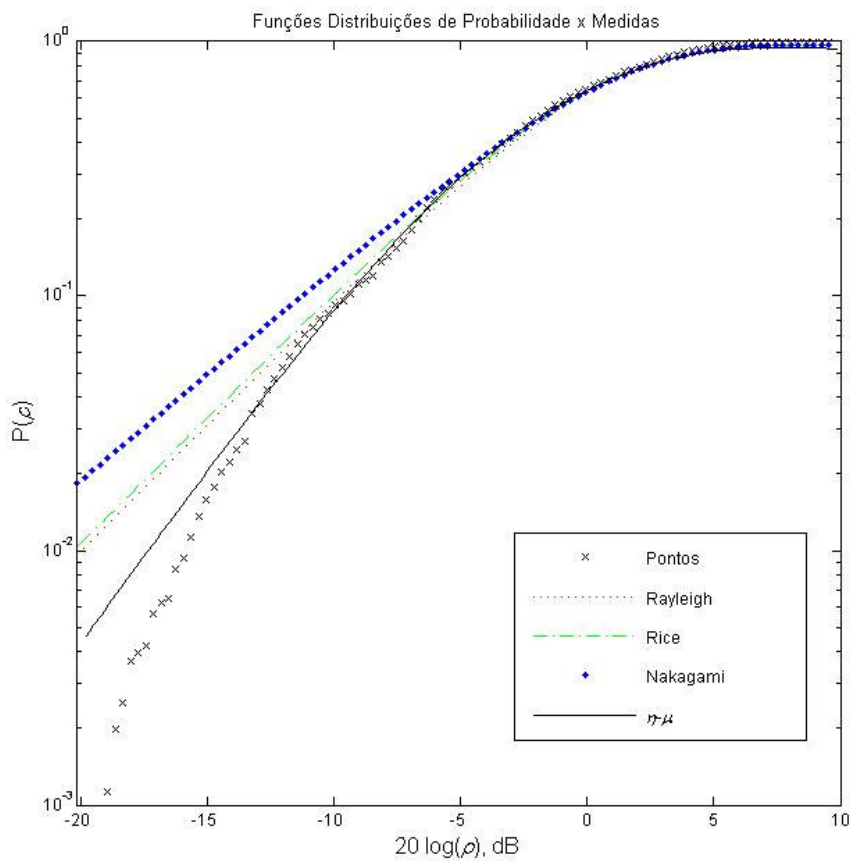
### 3.2.1 - Avaliação da Radial 1

1) Separação da componente de desvanecimento rápido que será a variável aleatória que compõe o modelo proposto. De acordo com a Figura 3.15, observa-se a separação das componentes de desvanecimento lento e rápido. Os dados medidos apresentaram um valor médio de  $-60,2721$  dB.

2) Com a componente de desvanecimento rápido será calculada a FDP que melhor se ajusta aos dados da referida radial, conforme mostrado na Figura 3.16.



**Figura 3.15** Desvanecimento lento e rápido – Radial 1.



**Figura 3.16** Gráfico de ajuste dos dados pelas FDPs – Radial 1.

A Tabela 3.10 apresenta os resultados do teste do qui-quadrado para todas as distribuições utilizadas, avaliando a componente de desvanecimento rápido. Neste caso a FDP que melhor se ajusta aos dados medidos é a FDP Eta-mi, com os seguintes parâmetros,  $\eta = 0,105$ ,  $m = 2,3187$  e  $\mu = 1,9199$ . Para o cálculo utilizou-se uma amostra de 100 pontos para verificação.

**Tabela 3.10** Resultado do teste do qui-quadrado ( $\chi^2$ ) – Radial 1.

Rayleigh	Rice	Nakagami	Eta-mi
26,5889	78,8437	78,9581	16,4528

3) Com os dados da variável aleatória, calculou-se o modelo, através da equação:

$$P_r = X\eta, \mu - PL_0 - \frac{P_{Tx}^1}{F_{norm}} \cdot e^{-k_1 \cdot d_1} - \frac{P_{Tx}^2}{F_{norm}} \cdot e^{-k_2 \cdot d_2} - c_1 \cdot \log_{10}(d_1 / d_0) - c_2 \cdot \log_{10}(d_2 / d_0)$$

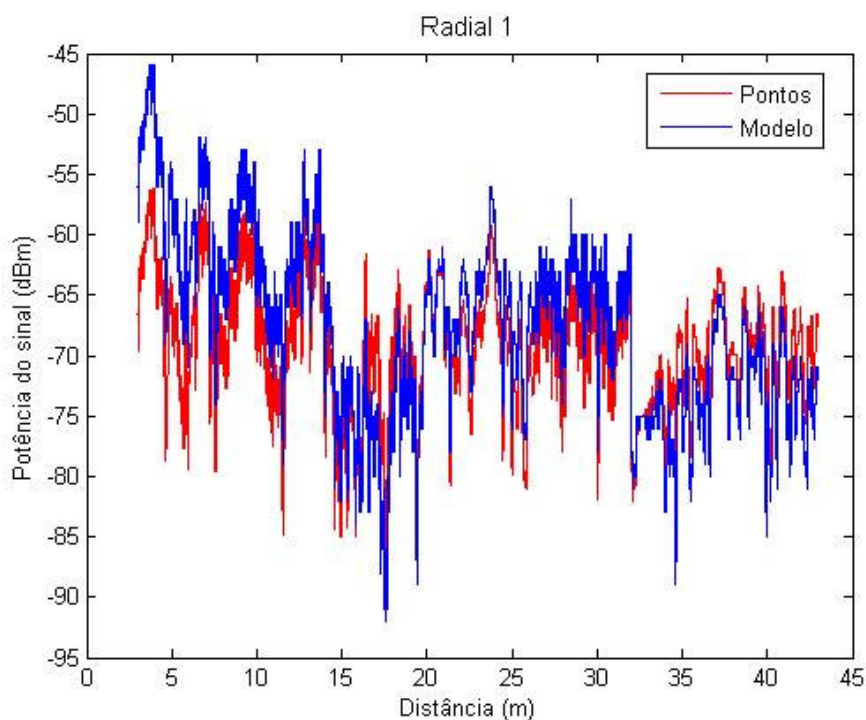
Os valores de  $k_1$ ,  $c_1$ ,  $k_2$  e  $c_2$  são dados pelas Equações (2.2) e (2.3). Sendo que  $k_2 = k_1$  e  $c_2 = c_1$ . O valor de  $\beta = -0,236$  dBm/m, representa a inclinação da curva dos dados medidos, continua o mesmo valor utilizado na praça de alimentação.

A Tabela 3.11 mostra os valores utilizados para o cálculo do modelo, aplicados à Radial 1.

**Tabela 3.11** Dados do modelo proposto para a Radial 1.

$PL_0$ (dB)	$P_{Tx}^1$ (dBm)	$P_{Tx}^2$ (dBm)	$F_{norm}$	$k_1$	$c_1$	$k_2$	$c_2$	<b>d</b> (m)	$d_0$ (m)	$\alpha$ (rad)
57,64	22,1	17,7	22,1	4,29	9,44	4,29	9,44	63,09	10	0,49

A Figura 3.17 apresenta o resultado da comparação entre o modelo proposto e os dados medidos, referentes à potência recebida.



**Figura 3.17** Gráfico dos dados medidos em comparação ao modelo proposto – Radial 1.

Na Tabela 3.12 são apresentados os erros do modelo proposto, observa-se que são bastante baixos conseguindo se ajustar aos dados medidos.

**Tabela 3.12** Erros do modelo proposto – Radial 1.

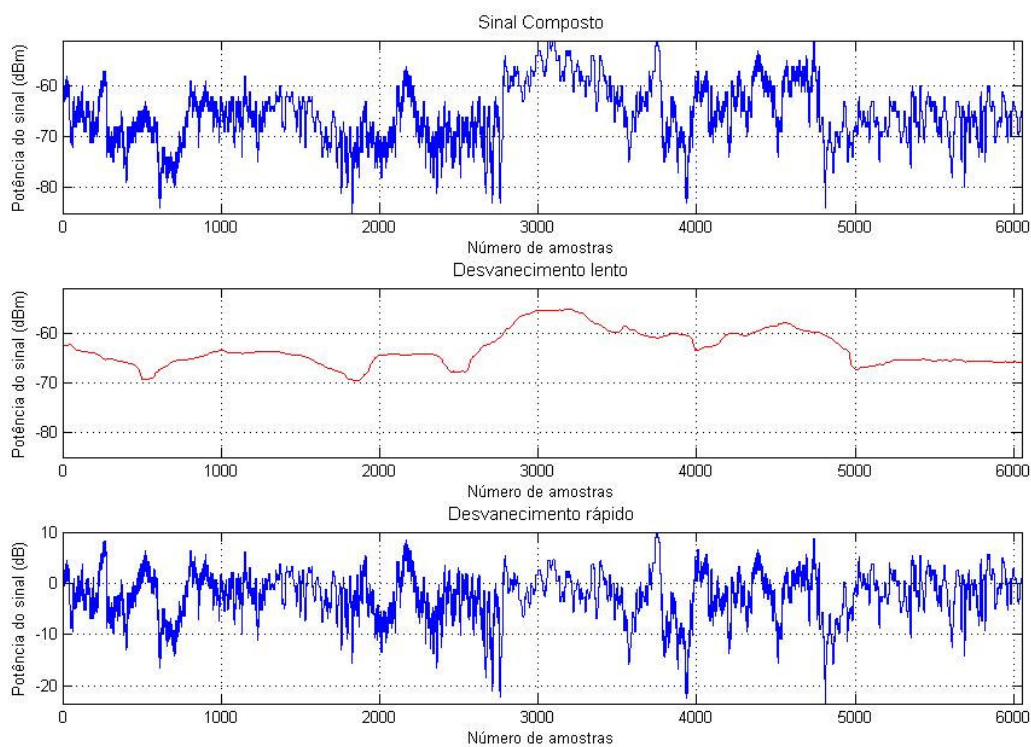
Radial 1	Erro absoluto (dB)	Desvio padrão (dB)	Erro rms (dB)
Modelo	3,9606	2,2137	4,5372

### 3.2.2 Avaliação da Radial 2

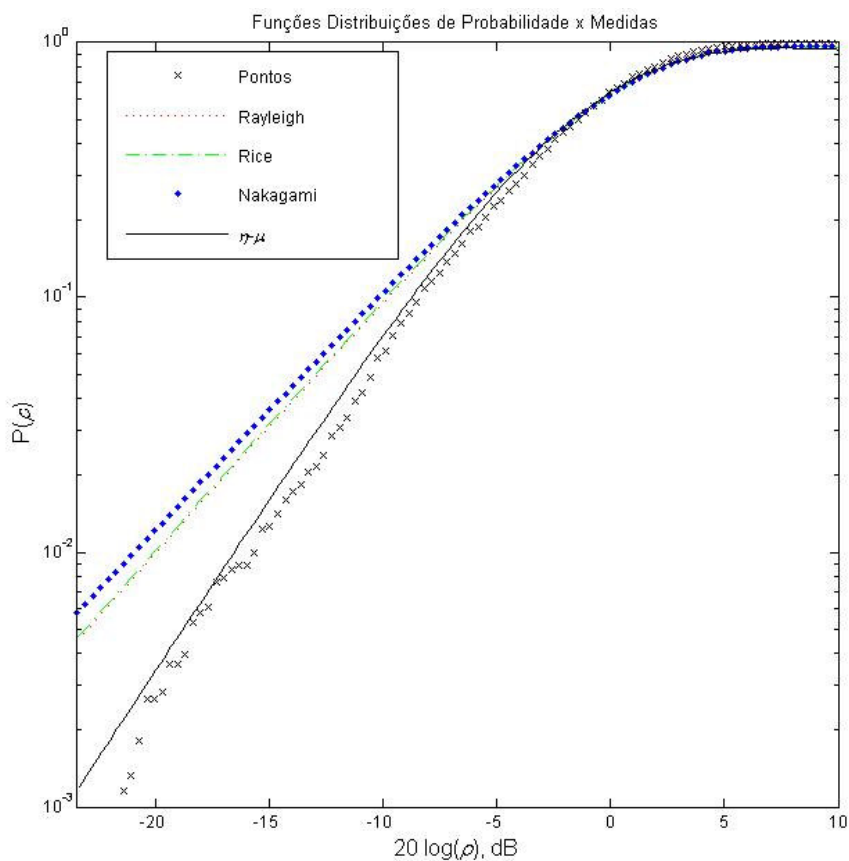
1) Separação da componente de desvanecimento rápido que será a variável aleatória que compõe o modelo proposto. De acordo com a Figura 3.18, observa-se

a separação das componentes de desvanecimento lento e rápido. Os dados medidos apresentaram um valor médio de -61,6348 dB.

2) Com a componente de desvanecimento rápido será calculada a FDP que melhor se ajusta aos dados da referida radial, conforme é mostrado na Figura 3.19.



**Figura 3.18** Desvanecimento lento e rápido – Radial 2.



**Figura 3.19** Gráfico de ajuste dos dados pelas FDPs – Radial 2.

A Tabela 3.13 apresenta os resultados do teste do qui-quadrado para todas as FDPs utilizadas no trabalho, avaliando a componente de desvanecimento rápido. Mais uma vez, a FDP que melhor se ajusta aos dados medidos é a distribuição Eta-mi, com os seguintes parâmetros,  $\eta = 0,105$ ,  $m = 0,94753$  e  $\mu = 0,6843$ . Para o cálculo utilizou-se uma amostra de 100 pontos para verificação.

**Tabela 3.13** Resultado do teste do qui-quadrado ( $\chi^2$ ) – Radial 2.

Rayleigh	Rice	Nakagami	Eta-mi
52,3148	20,1143	78,3241	15,7216



3) Com os dados da variável aleatória, calculou-se o modelo proposto, através da equação:

$$P_r = X\eta, \mu - PL_0 - \frac{P_{Tx}^1}{F_{norm}} \cdot e^{-k_1 \cdot d_1} - \frac{P_{Tx}^2}{F_{norm}} \cdot e^{-k_2 \cdot d_2} - c_1 \cdot \log_{10}(d_1 / d_0) - c_2 \cdot \log_{10}(d_2 / d_0)$$

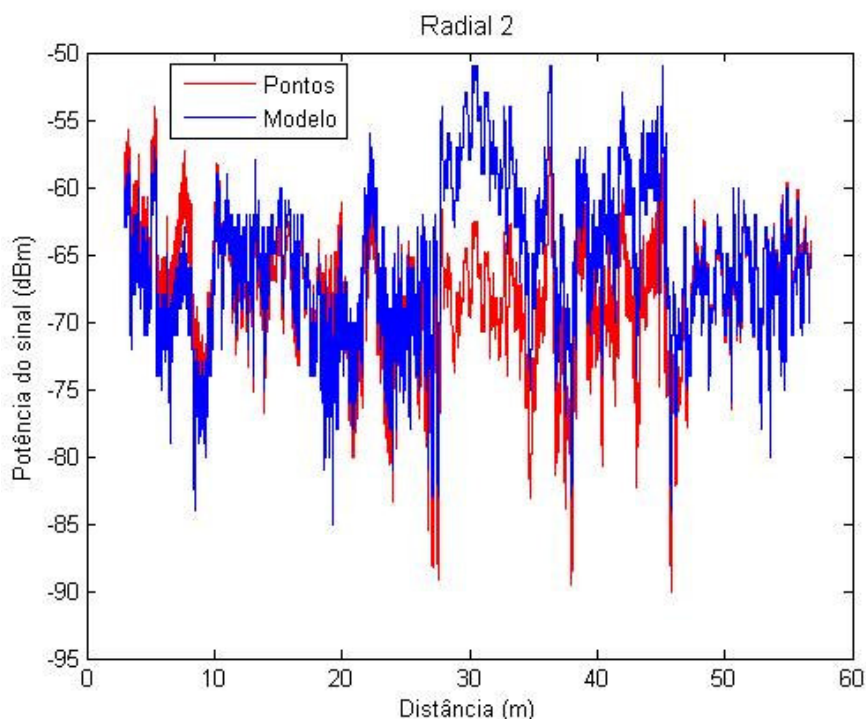
Os valores de  $k_1$ ,  $c_1$ ,  $k_2$  e  $c_2$  são dados pelas Equações (2.2) e (2.3). Sendo que  $k_2 = k_1$  e  $c_2 = c_1$ . O valor de  $\beta = -0,236$  dBm/m.

A Tabela 3.14 mostra os valores utilizados para o cálculo do modelo, aplicados à Radial 2.

**Tabela 3.14** Dados do modelo proposto para a Radial 2.

$PL_0$ (dB)	$P_{Tx}^1$ (dBm)	$P_{Tx}^2$ (dBm)	$F_{norm}$	$k_1$	$c_1$	$k_2$	$c_2$	$d_0$ (m)	<b>d</b> (m)	$\alpha$ (rad)
57,64	22,1	17,7	22,1	4,29	9,44	4,29	9,44	10	63,09	0,14

A Figura 3.20 apresenta o resultado da comparação entre o modelo proposto e os dados medidos, referentes à potência recebida.



**Figura 3.20** Gráfico dos dados medidos em comparação ao modelo proposto – Radial 2.

Na Tabela 3.15 são apresentados os erros do modelo proposto, que também são bastante baixos conseguindo se ajustar aos dados medidos.

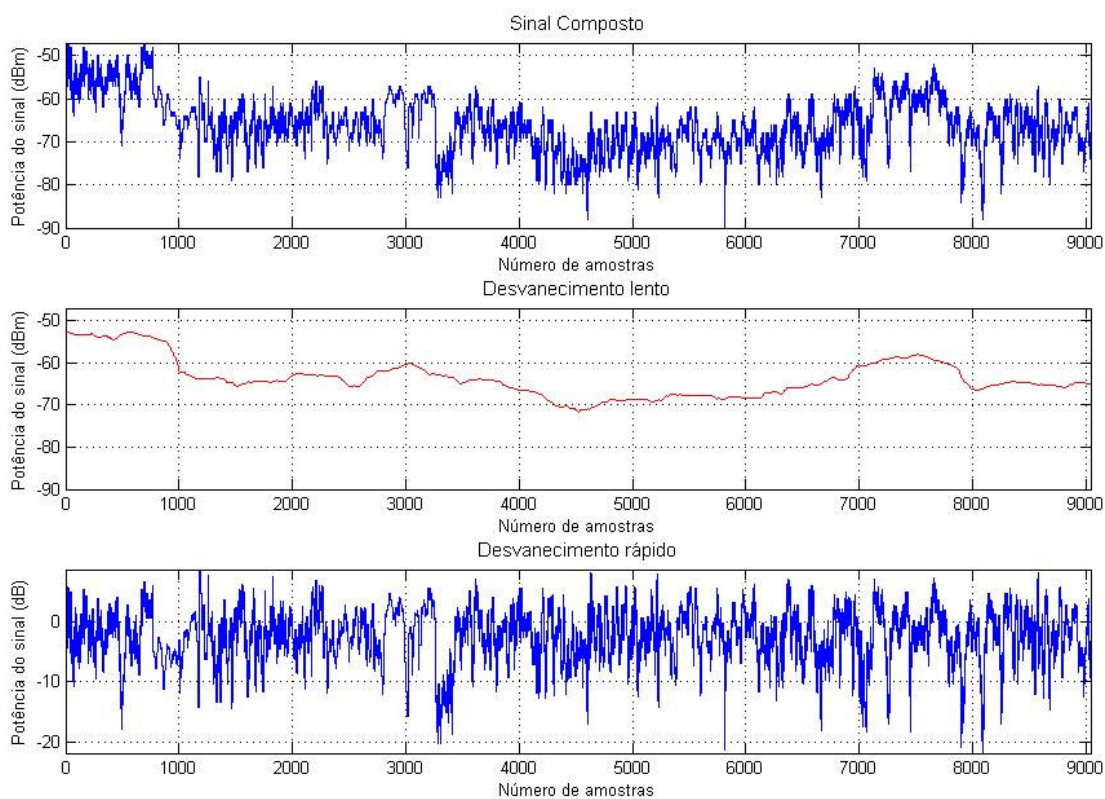
**Tabela 3.15** Erros do modelo proposto – Radial 2.

Radial 2	Erro absoluto (dB)	Desvio padrão (dB)	Erro rms (dB)
Modelo	3,8270	3,3842	5,1087

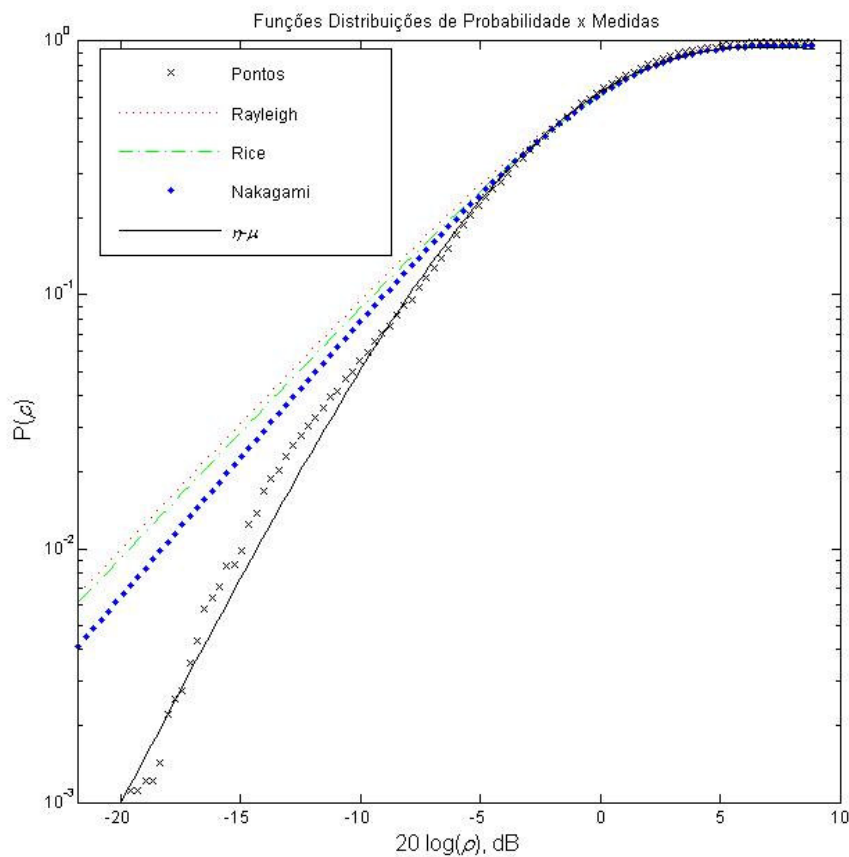
### 3.2.3 Avaliação da Radial 3

1) Separação da componente de desvanecimento rápido que será a variável aleatória que compõe o modelo proposto. De acordo com a Figura 3.21, observa-se a separação das componentes de desvanecimento lento e rápido. Os dados medidos apresentaram um valor médio de -60,7847 dB.

2) Com a componente de desvanecimento rápido será calculada a FDP que melhor se ajusta aos dados da referida radial, conforme é mostrado na Figura 3.22.



**Figura 3.21** Desvanecimento lento e rápido – Radial 3.



**Figura 3.22** Gráfico de ajuste dos dados pelas FDPs – Radial 3.

A Tabela 3.16 apresenta os resultados do teste do qui-quadrado para todas as FDPs utilizadas no trabalho, avaliando a componente de desvanecimento rápido. Neste caso a FDP que melhor se ajusta aos dados medidos é a distribuição Eta-mi, com os seguintes parâmetros,  $\eta = 0,105$ ,  $m = 1,1085$  e  $\mu = 0,9178$ . Para o cálculo utilizou-se uma amostra de 100 pontos para verificação.

**Tabela 3.16** Resultado do teste do qui-quadrado ( $\chi^2$ ) – Radial 3.

Rayleigh	Rice	Nakagami	Eta-mi
75,2542	25,9664	37,0451	8,3558

3) Com os dados da variável aleatória, calculou-se o modelo proposto, através da equação:

$$P_r = X\eta, \mu - PL_0 - \frac{P_{Tx}^1}{F_{norm}} \cdot e^{-k_1 \cdot d_1} - \frac{P_{Tx}^2}{F_{norm}} \cdot e^{-k_2 \cdot d_2} - c_1 \cdot \log_{10}(d_1 / d_0) - c_2 \cdot \log_{10}(d_2 / d_0)$$

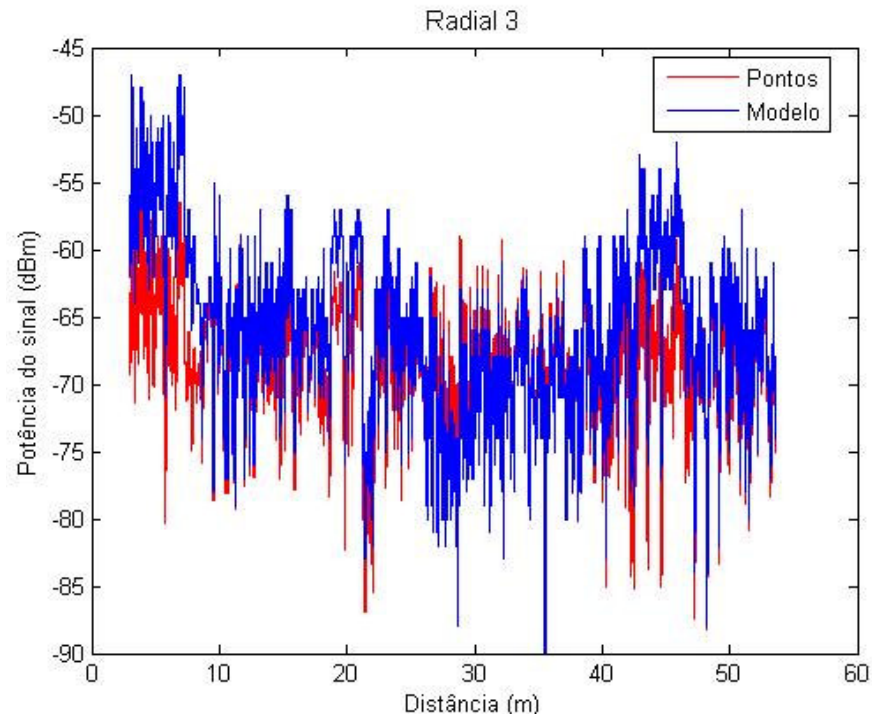
Os valores de  $k_1$ ,  $c_1$ ,  $k_2$  e  $c_2$  são dados pelas Equações (2.2) e (2.3). Sendo que  $k_2 = k_1$  e  $c_2 = c_1$  e o valor de  $\beta = -0,236$  dBm/m.

A Tabela 3.17 mostra os valores utilizados para o cálculo do modelo proposto, aplicados à Radial 3.

**Tabela 3.17** Dados do modelo proposto para a Radial 3.

$PL_0$ (dB)	$P_{Tx}^1$ (dBm)	$P_{Tx}^2$ (dBm)	$F_{norm}$	$k_1$	$c_1$	$k_2$	$c_2$	$d_0$ (m)	<b>d</b> (m)	$\alpha$ (rad)
57,64	22,1	17,7	22,1	4,29	9,44	4,29	9,44	10	63,09	0,17

A Figura 3.23 apresenta o resultado da comparação entre o modelo proposto e os dados medidos, referentes à potência recebida.



**Figura 3.23** Gráfico dos dados medidos em comparação ao modelo proposto – Radial 3.

Na Tabela 3.18 são apresentados os erros do modelo proposto, observa-se que são bastante baixos conseguindo mais uma vez ajustar-se aos dados medidos.

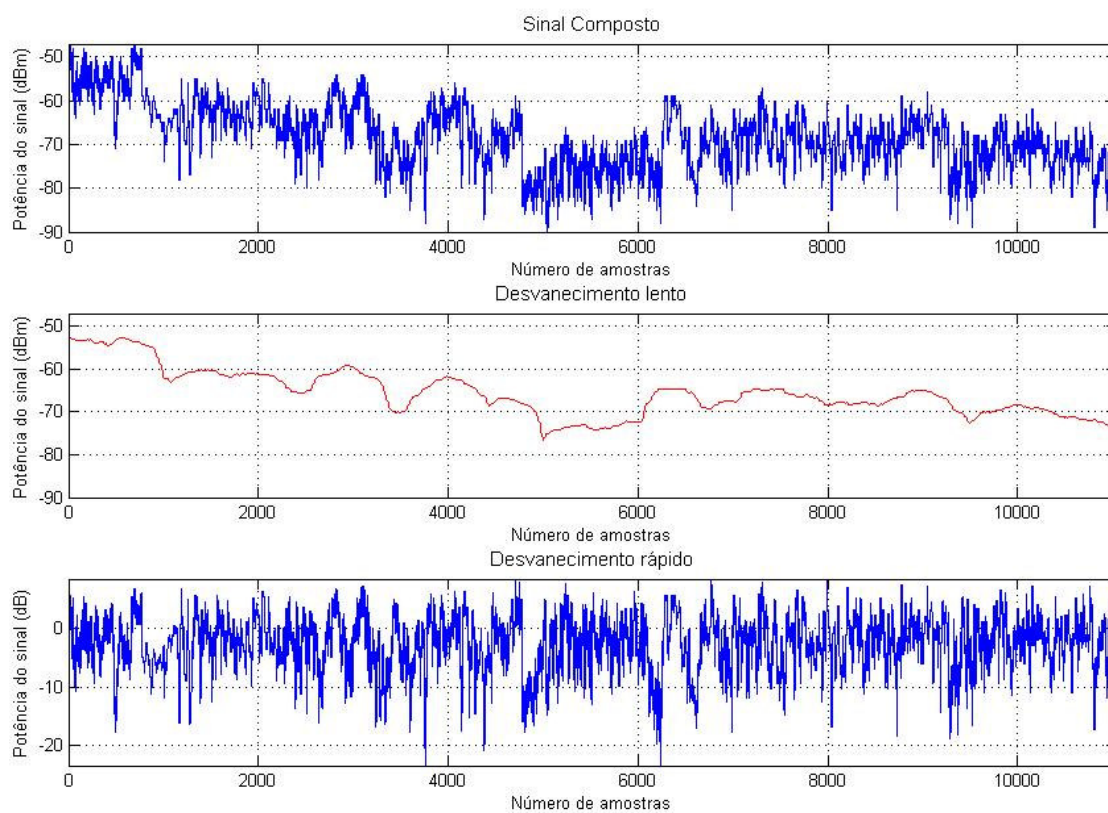
**Tabela 3.18** Erros do modelo proposto – Radial 3.

Radial 3	Erro absoluto (dB)	Desvio padrão (dB)	Erro rms (dB)
Modelo	3,1456	2,8070	4,2159

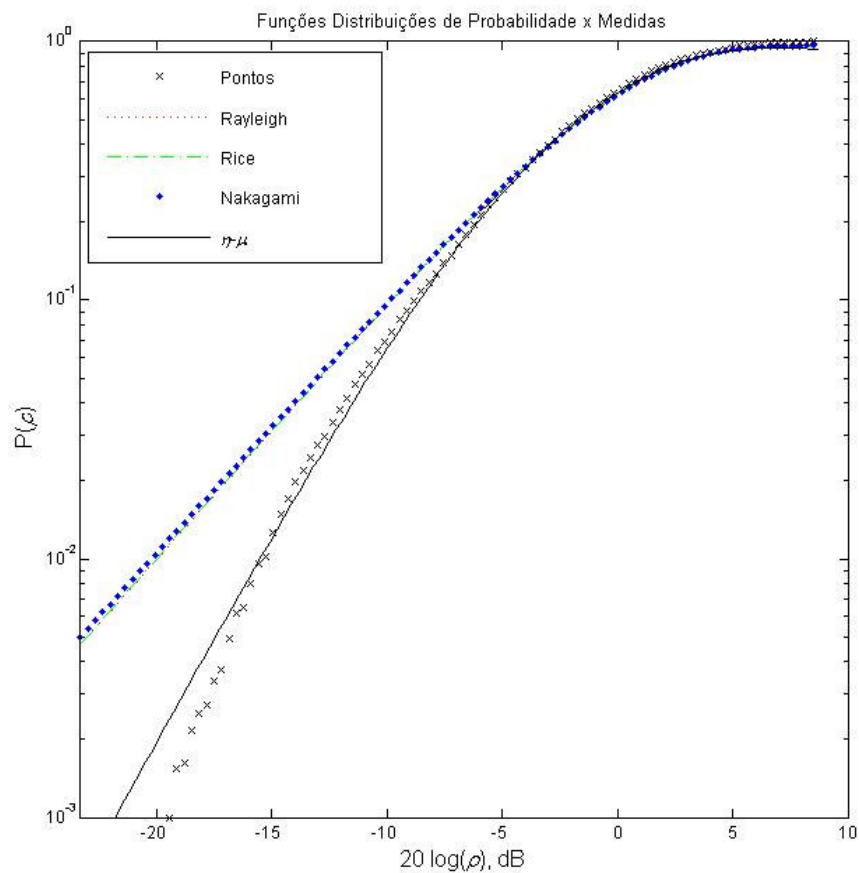
### 3.2.4 Avaliação da Radial 4

1) Separação da componente de desvanecimento rápido que será a variável aleatória que compõe o modelo proposto. De acordo com a Figura 3.24, observa-se a separação das componentes de desvanecimento lento e rápido. Os dados medidos apresentaram um valor médio de -61,8282 dB.

2) Com a componente de desvanecimento rápido será calculada a FDP que melhor se ajusta aos dados da referida radial, conforme é mostrado na Figura 3.25.



**Figura 3.24** Desvanecimento lento e rápido – Radial 4.



**Figura 3.25** Gráfico de ajuste dos dados pelas FDPs – Radial 4.

A Tabela 3.19 apresenta os resultados do teste do qui-quadrado para todas as FDPs utilizadas no trabalho, avaliando a componente de desvanecimento rápido. Neste caso a FDP que melhor se ajustou aos dados medidos é a distribuição Eta-mi, com os seguintes parâmetros,  $\eta = 0,105$ ,  $m = 0,98585$  e  $\mu = 0,8163$ . Para o cálculo utilizou-se uma amostra de 100 pontos para verificação.

**Tabela 3.19** Resultado do teste do qui-quadrado ( $\chi^2$ ) – Radial 4.

Rayleigh	Rice	Nakagami	Eta-mi
42,4642	42,9758	49,3121	5,0374



3) Com os dados da variável aleatória, calculou-se o modelo proposto, através da equação:

$$P_r = X\eta, \mu - PL_0 - \frac{P_{Tx}^1}{F_{norm}} \cdot e^{-k_1 \cdot d_1} - \frac{P_{Tx}^2}{F_{norm}} \cdot e^{-k_2 \cdot d_2} - c_1 \cdot \log_{10}(d_1 / d_0) - c_2 \cdot \log_{10}(d_2 / d_0)$$

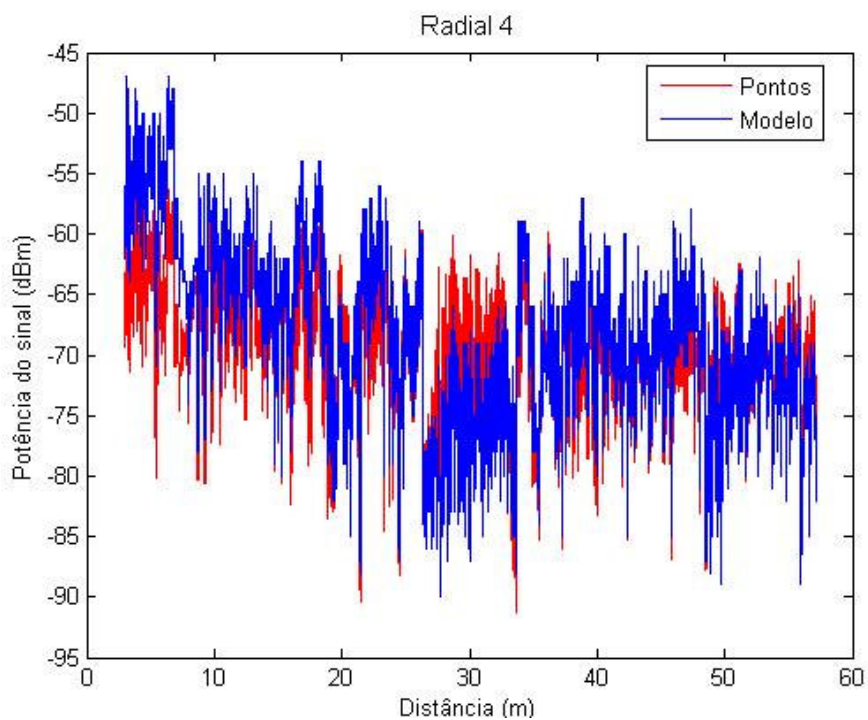
Os valores de  $k_1$ ,  $c_1$ ,  $k_2$  e  $c_2$  são dados pelas Equações (2.2) e (2.3). Sendo que  $k_2 = k_1$  e  $c_2 = c_1$  e o valor de  $\beta = -0,236$  dBm/m.

A Tabela 3.20 mostra os valores utilizados para o cálculo do modelo proposto, aplicados à Radial 4.

**Tabela 3.20** Dados do modelo proposto para a Radial 4.

$PL_0$ (dB)	$P_{Tx}^1$ (dBm)	$P_{Tx}^2$ (dBm)	$F_{norm}$	$k_1$	$c_1$	$k_2$	$c_2$	$d_0$ (m)	<b>d</b> (m)	$\alpha$ (rad)
57,64	22,1	17,7	22,1	4,29	9,44	4,29	9,44	10	63,09	0,51

A Figura 3.26 apresenta o resultado da comparação entre o modelo proposto e os dados medidos, referentes à potência recebida.



**Figura 3.26** Gráfico dos dados medidos em comparação ao modelo proposto – Radial 4.

Na Tabela 3.21 são apresentados os erros do modelo proposto, e observa-se mais uma vez que são baixos

**Tabela 3.21** Erros do modelo proposto – Radial 4.

Radial 4	Erro absoluto (dB)	Desvio padrão (dB)	Erro rms (dB)
Modelo	3,2587	2,4377	4,0696

## CONCLUSÃO

O presente trabalho buscou realizar uma caracterização de um ambiente de comunicação com grande fluxo de pessoas e com alta demanda por serviços de comunicação que foi o caso de um *shopping center*. Dessa forma foi proposto um modelo de predição da potência recebida que envolve a componente de desvanecimento rápido do sinal, objetivando caracterizar o local através da incorporação dos parâmetros de perda e os fenômenos de propagação envolvidos. A necessidade de se estabelecer um modelo de predição busca levar em conta a variabilidade de configurações arquiteturais, materiais de construção, e o efeito da frequência.

O local, por ser um grande centro de lojas, apresenta muitos obstáculos, pontos dispersores de sinal, que contribuem tanto de maneira positiva quanto negativa na composição do sinal.

O ambiente estudado possui um DAS, com um sistema irradiante de transmissão, sendo distribuído por várias antenas ao mesmo tempo. Portanto, para a análise, escolheram-se dois ambientes, que apesar de estarem no mesmo local apresentam características diferentes. Sendo que um era atendido com dois transmissores e o outro com apenas um.

Para o tratamento dos dados cada local escolhido foi dividido em radiais que partem dos transmissores, para avaliar a variabilidade do sinal em alguns pontos do ambiente.

A análise dos dados demonstrou que as distribuições desenvolvidas recentemente como a Eta-mi, conseguem ajustar os dados onde as distribuições mais utilizadas na literatura não conseguem.

Os resultados obtidos de erros mostram que o modelo possui erros baixos comparados com os dados medidos e consegue caracterizar de modo excelente o ambiente. Essa comparação foi feita para a validação do modelo proposto.

O modelo proposto possui uma forma bastante simples com dados de fácil aquisição, ratificando a proposta alcançada. O modelo proposto pode ser aplicado para o caso de duas fontes e como caso particular para o de uma fonte. Um modelo com essa abordagem é de suma importância, para os grandes centros de escritórios, de lojas, necessitam de um atendimento particular, visto que as células *outdoor* não conseguem muitas vezes atender os usuários com um nível de sinal de qualidade, utilizando assim Sistemas de Antenas Distribuídas.

Sugere-se para trabalhos futuros fazer uma avaliação para uma quantidade maior de fontes transmissoras, como ocorre em WLANs, que possuem várias antenas, chamadas de pontos de acesso. Além disso, com a utilização do modelo proposto, pode-se buscar uma otimização da localização das fontes transmissoras. Podendo ser acrescentado parâmetros de Qualidade de Serviço (na sigla em inglês, QoS), Taxa de Erro de Bit (na sigla em inglês, BER), etc., visando a análise de transmissões de dados nos sistemas de comunicações móveis.

## REFERÊNCIAS

- [1] HASHEMI, Homayoun. **The Indoor Radio Propagation Channel**. Proceedings of the IEEE, Vol. 81, No. 7, July 1993.
- [2] BABICH, Fulvio, and LOMBARDI, Giancarlo, **Statistical Analysis and Characterization of the Indoor Propagation Channel**. IEEE Transactions on Communications, Vol. 48, No. 3, March 2000.
- [3] RAPPAPORT, T. S. **Wireless Communications: Principles and Practice**. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, Second Edition, 2002.
- [4] ALENCAR, Marcelo Sampaio de. **Telefonia Celular Digital**. São Paulo, SP. 1 ed. Érica, 2004.
- [5] LIMA, Rosely A., BARBOSA, Regiane N. S., RODRIGUES, Josiane do C., NEVES, Antonio de A., FRAIHA, Simone G. C., GOMES, Hermínio S., e CAVALCANTE, Gervásio P. S. **Modelo Semi-Empírico da Perda de Propagação para Comunicações Móveis Indoor na faixa de 800 MHz**. Anais do XXI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES – SBrT'04, 06-09 de Setembro 2004. Belém, PA.
- [6] LIMA, Rosely A., NEVES, Antonio de A. e CAVALCANTE, Gervásio P. S. **Modelo RA de Predição de Canal em Ambientes Suburbanos utilizando Redes Neurais Artificiais**. Anais do XXII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES - SBrT'05, 04-08 de Setembro de 2005. Campinas, SP.
- [7] LIMA, Rosely A., NEVES, Antonio de A. e CAVALCANTE, Gervásio P. S. **Caracterização do Canal através de um Modelo Híbrido de Predição em Ambientes Suburbanos**. Anais do 6º CONGRESSO BRASILEIRO DE ELETROMAGNETISMO (CBMAG) E O 11º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MICROONDAS E OPTOELETRÔNICA (SBMO) – MOMAG 2004, 16-19 de Agosto de 2004. São Paulo, SP.
- [8] YACOUB, Michel Dauod. **General Fading Distributions** - Revista Brasileira de Telecomunicações, v.17, p. 1-13, Junho de 2002.
- [9] PAHLAVAN, Kaveh, and ALI, Mudhafar Hassan. **A new statistical Model for Site-Specific Indoor Radio Propagation Prediction Based on Geometric Optics and Geometric Probability**. IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 1, No. 1, January 2002.

[10] NESKOVIC, A., NESKOVIC, N., and PAUNOVIC, D. **Modern Approaches in Modeling of Mobile Radio Systems Propagation Environment**. IEEE Communication Surveys, Third Quarter 2000, pp. 2-12.

[11] SILVA, Vanderlei Aparecido da. **Modelagem Computacional de Canais de Comunicação Móvel**. São Paulo, 2004, 201. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

[12] SOUZA, Rausley Adriano Amaral de. **Análise de Desempenho de Técnicas de Comunicação Digital em Canais com Distribuição  $\kappa - \mu$ , desvanecimento lento e não-seletivo em frequência**. Santa Rita do Sapucaí, 2002, 84. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Instituto Nacional de Telecomunicações - INATEL.

[13] ANTONIO, Jamil Ribeiro. **Área de cobertura em ambiente de propagação modelado com a distribuição  $\kappa - \mu$** . Santa Rita do Sapucaí, 2003, 106. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Instituto Nacional de Telecomunicações - INATEL.

[14] MARTINS, Fábio César, TERCIUS, Hermano Barros, YACOUB, Michel Dauod. **Medidas de banda estreita em 1800 MHz e as Distribuições de Desvanecimento  $\kappa - \mu$  e  $\eta - \mu$** . Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações – SBT'04, Belém – PA, Setembro 2004.

[15] **TDMA/136 Indoor Cell Planning, Student Text**, ERICSSON, Ver. R1B – 2000-08-30.

[16] RAPPAPORT, Theodore S. **In-building Wireless Tutorial – The Last 100 Meters of the Wireless Revolution**. 11<sup>th</sup> Annual MPRG Symposium June 6-8, 2001.

[17] LAGARIAS, Jeffrey C., REEDS, James A., WRIGHT, Margaret H., e WRIGHT, Paul E. **Convergence properties of the Nelder-Mead simplex method in low dimensions**. *SIAM Journal on Optimization*, 9(1):112-147, 1998.

[18] MathWorks, Inc. FMINSEARCH. MATLAB *function*. Obtida do comando 'type fminsearch'.

## ANEXO – Algoritmo de Nelder Mead

O método Simplex de Nelder-Mead é um método de procura direta: ele tenta minimizar uma função de  $n$  variáveis reais usando somente valores da função, sem informação derivada. Para fazer isto o método mantém um simplex, a parte convexa de  $n+1$  pontos distintos (vértices). Aqui, se apresenta o principal algoritmo no MATLAB, o procedimento *fminsearch* [17], que é baseado no algoritmo apresentado em [18].

### Algoritmo 1 Rotina *fminsearch* (MATLAB)

1. Se o diâmetro do simplex é menor que uma dada tolerância (Tolx) e os valores da função diferem do valor mínimo por menos de uma dada tolerância (Tolf) ou as funções de máximo tenham sido excedidas, ele termina. Caso contrário, ele continua.

2. Ordena os vértices do simplex de acordo com seus valores de função correspondente, do menor para o maior. (Procura-se por um ponto para substituir o pior vértice ( $n+1$ )).

3. Constrói o ponto de reflexão,  $x_r$ , do centróide dos melhores vértices e do pior vértice ( $n+1$ ):

$$x_r = (1 + \rho)\bar{x} - \rho x_{n+1} \quad (1)$$

(Na *fminsearch*,  $\rho = 1$ .)

4. (Expansão) Se  $F(x_r) < F(x_1)$ , então o ponto de expansão  $x_e$  é calculado:

$$x_e = (1 + \rho\chi)\bar{x} - \rho\chi x_{n+1} \quad (2)$$

(Na *fminsearch*,  $\chi = 2$ ). Se  $F(x_e) < F(x_r)$ , fazer  $x_{n+1} = x_e$ ; caso contrário fazer  $x_{n+1} = x_r$ . Terminar a iteração atual e retornar ao Passo 1.

5. (Reflexão) Se  $F(x_r) < F(x_n)$ , fazer  $x_{n+1} = x_r$ . Termina a iteração atual e retorna ao Passo 1.

6. (Contração) Tem-se que  $F(x_r) \geq F(x_n)$ , e executa uma contração entre  $\bar{x}$  e o melhor de  $x_{n+1}$  e  $x_r$ .

- Se  $F(x_r) < F(x_{n+1})$ , executa uma contração de fora. Calcula

$$x_c = (1 + \psi\rho)\bar{x} - \psi\rho x_{n+1} \quad (3)$$

(Na *fminsearch*,  $\psi = 0,5$ ). Se  $F(x_c) \leq F(x_r)$ , faça  $x_{n+1} = x_c$ , termina a iteração atual e retorna ao Passo 1. Caso contrário, vai para o Passo 7.

- Tem-se que  $F(x_r) \geq F(x_{n+1})$ , e executa uma contração interna. Calcula

$$x_{cc} = (1 + \psi)\bar{x} - \psi x_{n+1} \quad (4)$$

Se  $F(x_{cc}) < F(x_{n+1})$ , configura-se  $x_{n+1} = x_{cc}$ , termina a iteração atual e retorna ao Passo 1. Caso contrário vai para o Passo 7.

7. (Passo de *shrink* (encolhimento)) O simplex é encolhido. Faz

$$v_i = x_1 + \sigma(x_i - x_1) \quad (5)$$

Para  $i = 2, \dots, n+1$ . (Na *fminsearch*,  $\sigma = 0,5$ ). Atribui os novos vértices do simplex como  $x_1, v_2, \dots, v_{n+1}$ . Termina a iteração corrente e retorna ao Passo 1.

Na *fminsearch* o usuário pode especificar as tolerâncias Tolf e Tolx, o número máximo de funções de avaliação e o número máximo de iterações.