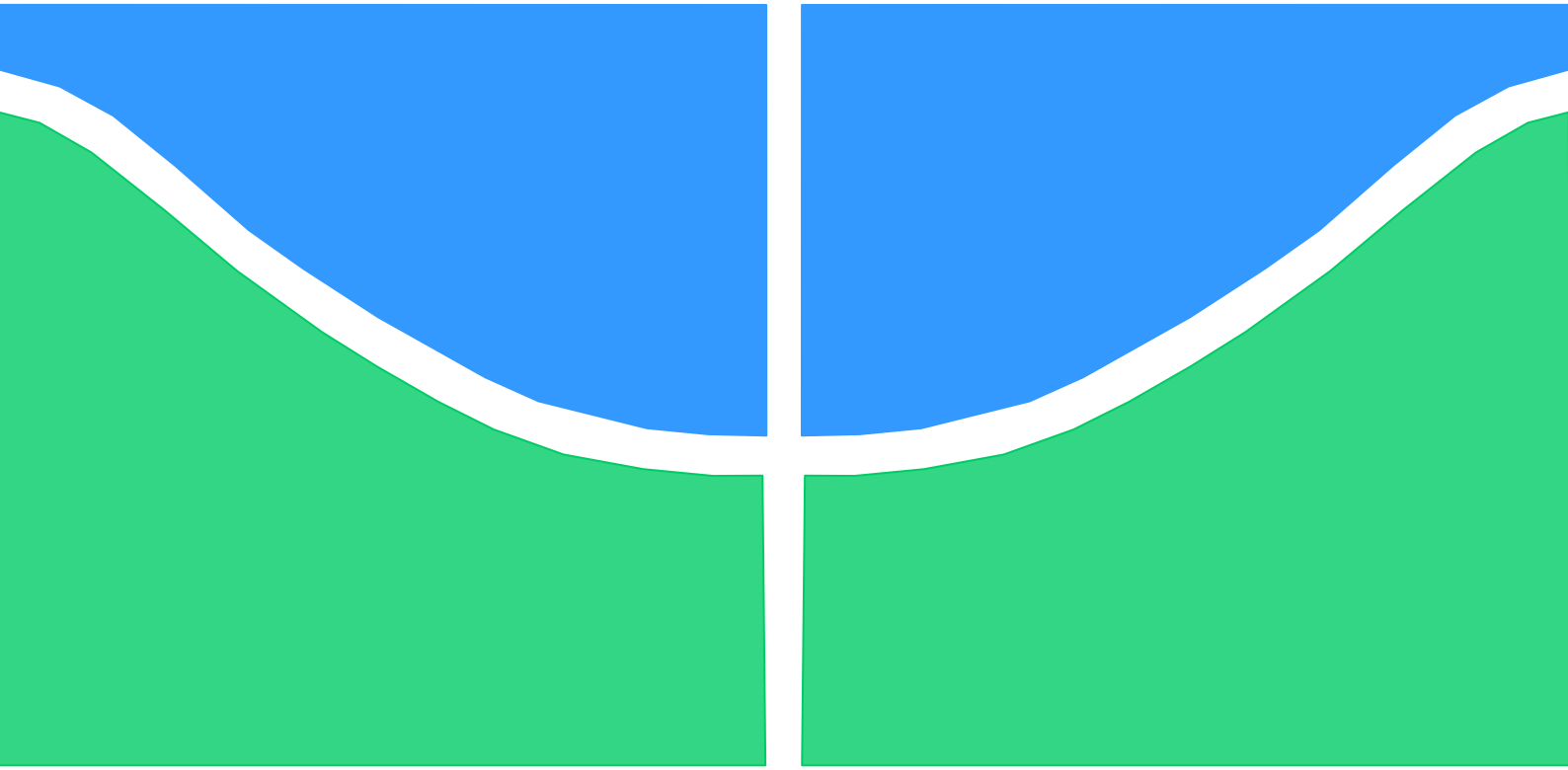

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Estudo de melhoria de cobertura de rede sem fio em ambientes fechados com a implementação de femtocélulas

Jurandy Gomes Barbosa Neto
Ramon Silva Mendonça

Brasília, novembro de 2012

UNIVERSIDADE DE BRASILIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASILIA
Faculdade de Tecnologia

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Estudo de melhoria de cobertura de rede sem fio em ambientes fechados com a implementação de femtocélulas

Jurandy Gomes Barbosa Neto
Ramon Silva Mendonça

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro de Redes de Comunicação

Banca Examinadora

Prof. Ugo Silva Dias, ENE/UnB (Orientador) _____

Prof. Leonardo Aguayo, UnB _____

Prof. Plínio Ricardo Ganime, UnB _____

FICHA CATALOGRÁFICA

BARBOSA NETO, Jurandy Gomes; MENDONÇA, Ramon Silva
Estudo de melhoria de cobertura de rede sem fio em ambientes fechados com a implementação de femtocélulas [Distrito Federal] 2012.
XI, 54p., 297 mm (ENE/FT/UnB, Grau Obtido, Engenharia de Redes de Comunicação, 2012).

Monografia de Graduação – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Femtocélula 2. Ambiente fechado

I. ENE/FT/UnB. II. Título (Série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BARBOSA NETO, Jurandy Gomes; MENDONÇA, Ramon Silva (2012). ESTUDO DE MELHORIA DE COBERTURA DE REDE SEM FIO EM AMBIENTES FECHADOS COM A IMPLEMENTAÇÃO DE FEMTOCÉLULAS. Monografia de Graduação, Publicação 11/2012, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 54p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DOS AUTORES: Jurandy Barbosa Gomes Neto e Ramon Silva Mendonça.
TÍTULO DA MONOGRAFIA: ESTUDO DE MELHORIA DE COBERTURA DE REDE SEM FIO EM AMBIENTES FECHADOS COM A IMPLEMENTAÇÃO DE FEMTOCÉLULUAS.
GRAU/ANO: Graduação/2012.

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta Monografia de Graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. Do mesmo modo, a Universidade de Brasília tem permissão para divulgar este documento em biblioteca virtual, em formato que permita o acesso via redes de comunicação e a reprodução de cópias, desde que protegida a integridade do conteúdo dessas cópias e proibido o acesso a partes isoladas desse conteúdo. Os autores reservam outros direitos de publicação e nenhuma parte deste documento pode ser reproduzida sem a autorização por escrito dos autores.

Jurandy Gomes Barbosa Neto
QE 24, Bloco A, Loja 10, Ap 301, Guará II
CEP 71.060-610 – Guará – DF - Brasil

Ramon Silva Mendonça
SQN 111, Bloco B, Ap 602, Asa Norte
CEP 70.754-020 – Brasília – DF - Brasil

Dedicatória(s)

Dedico este trabalho para minha família, que me incentivou a prosseguir nos estudos para conquistar meus objetivos.

Jurandy Gomes Barbosa Neto

A realização deste trabalho é dedicada a todos que, de forma direta ou não, apoiaram e incentivaram a minha perseverança durante o curso.

Ramon Silva Mendonça

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, a Deus, que me forneceu tudo que me foi necessário, sem o qual não chegaria até aqui. À minha família que me deu apoio e incentivo para seguir com os estudos. Ao professor Ugo Dias, que nos instruiu e sempre nos auxiliou nas resoluções dos problemas que surgiram em todas as etapas desse trabalho.

Jurandy Gomes Barbosa Neto

Agradeço, inicialmente, a Deus, que sempre iluminou a minha pessoa, sem O Qual não estaria aonde estou. Ao professor Ugo Dias, que nos apoiou demasiadamente para a realização desse trabalho, com muito incentivo e sábios conselhos. Igualmente importante foi o apoio dado por minha família, que sempre acreditou em mim e me forneceu grande incentivo para a conclusão do curso.

Ramon Silva Mendonça

RESUMO

O trabalho teve como objetivo o estudo e a implementação de uma femtocélula em ambientes fechados, nos quais o sinal da rede celular é deficiente e insuficiente para comunicação. Primeiro, foram realizadas pesquisas a respeito das principais características desse tipo de célula. Depois, foram identificados locais que obedecessem aos requisitos do projeto para a montagem da femtocélula. Então, foi simulada, em cada ambiente, a rede interna e capturadas partes do espectro do sinal da rede celular, para efeitos de comparação. Por fim, a análise e tratamento dos dados obtidos foram realizados com a ajuda de programas computacionais e com a utilização de modelos de estatísticas de primeira e segunda ordem largamente utilizados na literatura.

Palavras-chave: femtocélula, ambiente fechado, rede celular, estatísticas de primeira ordem, estatísticas de segunda ordem.

ABSTRACT

The aim of this work was the study and implementation of a femtocell into interno environments, in which the cellular network signal level is weak. First, it was done researches about of main characteristics of this kind of cell. After this, they were identified places that fit with project requirements for the femtocell assembly. Then, it was simulated, in each environment, the interno network and captured parts of cellular network spectrum, for comparison purposes. Finally, the analysis and treatment of obtained data were done with the help of computing programs and with the use of first order and second order statistic models that are widely used in the literature.

Keywords: femtocell, interno environment, cellular network, first order statistics, second order statistics.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 1
1.1 ASPECTOS GERAIS 1
1.2 JUSTIFICATIVAS 1
1.3 OBJETIVOS 2
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO 2

2 FEMTOCÉLULA 3
2.1 INTRODUÇÃO 3
2.2 FORMAS DE ACESSO 4
2.3 INTERFERÊNCIA 4
2.4 CONTROLE DE ACESSO 6
2.5 AUTO-ORGANIZAÇÃO 7
2.6 SEGURANÇA 8
2.7 CONCLUSÕES 8

3 MEDIÇÕES EM CAMPO 9
3.1 SISTEMAS DE MEDIÇÃO 9
3.1.1 SISTEMA TRANSMISSOR 9
3.1.1.1 ANTENA OMNIDIRECIONAL 9
3.1.1.2 ANALISADOR DE REDE 10
3.1.2 SISTEMA RECEPTOR 11
3.1.2.1 ANALISADOR DE ESPECTRO 11
3.1.2.2 ANTENA OMNIDIRECIONAL 12
3.1.2.3 PLACA DE AQUISIÇÃO DE DADOS 12
3.1.2.4 NOTEBOOK 13
3.1.3 MEDIÇÃO DO SINAL DA REDE CELULAR 14
3.2 CONFIGURAÇÕES DA FEMTOCÉLULA 15
3.3 AMBIENTES DE MEDIÇÃO 16
3.3.1 AMBIENTE 1: BIBLIOTECA CENTRAL DA UNB (BCE) 16
3.3.2 AMBIENTE 2: CORREDOR DA CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO (CIC) NO ICC 17
3.3.3 AMBIENTE 3: ESTAÇÃO DA 114 SUL DO METRÔ-DF 19
3.4 PROCEDIMENTOS DE MEDIÇÃO 20
3.5 CONCLUSÕES 20

4 RESULTADOS 21
4.1 NÍVEL DO SINAL DA REDE CELULAR 21
4.2 DADOS RELATIVOS ÀS MEDIÇÕES 23
4.3 SINAIS EMPÍRICOS 23
4.4 ESTATÍSTICAS DE PRIMEIRA ORDEM 25
4.5 DESVIOS MÉDIOS NAS ESTATÍSTICAS DE PRIMEIRA ORDEM 33
4.6 ESTATÍSTICAS DE SEGUNDA ORDEM 35
4.7 DESVIOS MÉDIOS NAS ESTATÍSTICAS DE SEGUNDA ORDEM 39
4.8 CONCLUSÕES 40

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS 41
5.1 CONCLUSÃO GERAL 41
5.2 TRABALHOS FUTUROS 41

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 42

LISTA DE FIGURAS

2.1 Esquemático da localização de uma macro e de uma femtocélula..... 3

3.1 Antena (2,5 GHz a 2,6 GHz) e cabo 10
3.2 Analisador de rede.....10
3.3 Analisador de espectro 11
3.4 Placa de aquisição de dados.....12
3.5 Curva aproximada dos valores obtidos de potência e tensão 13
3.6 Esquemático do sistema receptor 14
3.7 Logo do aplicativo.....14
3.8 *Smartphone* utilizado 15
3.9 Corredor entre estantes na BCE.....17
3.10 Final do corredor 17
3.11 Na metade do corredor do departamento da CIC 18
3.12 Sistemas transmissor e receptor junto a porta lacrada 18
3.13 Entrada do corredor da estação 19
3.14 Metade do corredor da estação.....19

4.1 Nível do sinal celular no ambiente 1 22
4.2 Sinal da rede celular ausente 22
4.3 Desvanecimento lento no percurso de afastamento no Ambiente 1 23
4.4 Desvanecimento lento no percurso de aproximação no Ambiente 1 24
4.5 Desvanecimento lento no percurso de afastamento no Ambiente 2 24
4.6 Desvanecimento lento no percurso de aproximação no Ambiente 2 24
4.7 Desvanecimento lento no percurso de afastamento no Ambiente 3 25
4.8 Desvanecimento lento no percurso de aproximação no Ambiente 3 25
4.9 PDFs dos sinais empírico e teóricos no Ambiente 1 quando o móvel se afasta do receptor 27
4.10 CDFs dos sinais empírico e teóricos no Ambiente 1 quando o móvel se afasta do receptor 27
4.11 PDFs dos sinais empírico e teóricos no Ambiente 1 quando o móvel se aproxima do receptor.....28
4.12 CDFs dos sinais empírico e teóricos no Ambiente 1 quando o móvel se aproxima do receptor.....28
4.13 PDFs dos sinais empírico e teóricos no Ambiente 2 quando o móvel se afasta do receptor 29
4.14 CDFs dos sinais empírico e teóricos no Ambiente 2 quando o móvel se afasta do receptor 29
4.15 PDFs dos sinais empírico e teóricos no Ambiente 2 quando o móvel se aproxima do receptor.....30
4.16 CDFs dos sinais empírico e teóricos no Ambiente 2 quando o móvel se aproxima do receptor.....30
4.17 PDFs dos sinais empírico e teóricos no Ambiente 3 quando o móvel se afasta do receptor 31
4.18 CDFs dos sinais empírico e teóricos no Ambiente 3 quando o móvel se afasta do receptor 31
4.19 PDFs dos sinais empírico e teóricos no Ambiente 3 quando o móvel se aproxima do receptor.....32
4.20 CDFs dos sinais empírico e teóricos no Ambiente 3 quando o móvel se aproxima do receptor.....32
4.21 ACFs dos sinais empírico e teóricos no Ambiente 1 quando o móvel se afasta do receptor 36
4.22 ACFs dos sinais empírico e teóricos no Ambiente 1 quando o móvel se aproxima do receptor.....37
4.23 ACFs dos sinais empírico e teóricos no Ambiente 2 quando o móvel se afasta do receptor 37

4.24 ACFs dos sinais empírico e teóricos no Ambiente 2 quando o móvel se aproxima do receptor 38
4.25 ACFs dos sinais empírico e teóricos no Ambiente 3 quando o móvel se afasta do receptor 38
4.26 ACFs dos sinais empírico e teóricos no Ambiente 3 quando o móvel se aproxima do receptor 39

LISTA DE TABELAS

3.1 Configurações da femtocélula 15

4.1 Dados relativos às medições 23
4.2 Parâmetros estimados 26
4.3 Desvios médios das PDFs no percurso de afastamento 33
4.4 Desvios médios das PDFs no percurso de aproximação 33
4.5 Desvios médios das CDFs no percurso de afastamento 34
4.6 Desvios médios das CDFs no percurso de aproximação 34
4.7 Desvios médios das ACFs no percurso de afastamento 39
4.8 Desvios médios das ACFs no percurso de aproximação 40

LISTA DE SIGLAS

Siglas

ACF	Autocorrelation Function
BCE	Biblioteca Central da UnB
CDF	Cumulative Distribution Function
CDMA	Code Division Multiple Access
CIC	Ciência da Computação
CINR	Carrier to Interfereance and Noise Ratio
DSL	Digital Subscriber Line
EFM	Ethernet in the First Mile
ERB	Estação Rádio-Base
FAP	Femto Access Point
GSM	Global System for Mobile Communications
ICC	Instituto Central de Ciências
IP	Internet Protocol
LA	Location Area
LOS	Line of Sight
MAC	Media Access Control
Metrô-DF	Companhia do Metropolitano do Distrito Federal
NodeB	Node for Broadband Access
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PDF	Probability Density Function
RBW	Resolution BandWidth
RF	Rádio-frequência
SINR	Signal-Interfereance plus Noise Ratio
TDMA	Time Division Multiple Access
USB	Universal Serial Bus
VBW	Video BandWidth
WCDMA	Wideband CDMA
WLAN	Wireless Local Area Network

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1 ASPECTOS GERAIS

O mundo tem apresentado um nível de evolução jamais visto ao longo de sua história. Observando todas essas transformações, é de se esperar que os meios de comunicação também apresentem essa rápida evolução. No mercado de telecomunicações, seus usuários estão migrando cada vez mais para equipamentos portáteis e de fácil manuseio, principalmente dentro de suas residências ou locais de trabalho, preterindo os tradicionais meios de comunicação até recentemente, como o telefone fixo e o computador de mesa.

O aumento da utilização de aparelhos portáteis em ambientes internos para comunicação a distância necessita de um replanejamento da estrutura de suporte a esses usuários. Atualmente, a rede de macrocélulas é a responsável por dar suporte para quase totalidade desses equipamentos no Brasil. Contudo, a qualidade do sinal é comprometida, uma vez que essa rede opera no nível ótimo quando seus clientes se encontram num ambiente externo.

A cobertura para os cenários internos pode ser melhorada com o emprego da tecnologia de femtocélulas. Femtocélulas são pontos de acesso à rede celular que conectam dispositivos móveis comuns a rede móvel da operadora por meio da linha digital de assinante (DSL), conexões de banda larga, fibras ópticas ou tecnologias sem fio de última milha (EFM) [1]. Também são conhecidas como estações base domésticas, pois elas incorporam as funcionalidades de uma estação rádio base convencional, se assemelhando a um ponto de acesso WiFi.

1.2 JUSTIFICATIVAS

Em redes de celulares, é estimado que 2/3 do trafego se dá em ambientes fechados, sendo que essa estimativa é maior que 90 por cento para serviços de transmissão de dados. Portanto é de extrema importância para a operadora de celular prover cobertura interna [3], não somente para voz, mas também para serviços de vídeo e para serviços de alta velocidade.

As soluções mais utilizadas são técnicas para macrocélulas. Em contrapartida, existem diversas desvantagens, algumas como a alta densidade de estações rádio base, interferência, complexidade que causa dificuldade em planejamento e gerência do sistema e a deterioração devido a obstáculos. Também existem soluções que utilizam redes de WLAN a fim de reduzir a carga de usuários conectados a rede celular, embora esse padrão tenha sido desenvolvido apenas para permitir uma certa mobilidade do terminal, cujas características são semelhantes aos computadores de mesa. Por isso, sua utilização não é aconselhável, já que não leva em consideração muitas características e pré-requisitos para o bom serviço de rede celular.

Por isso, é importante que se repense a rede de suporte dessa crescente demanda para que a comunicação desses usuários não se torne comprometida, uma vez que a tendência mundial é que ela cresça vertiginosamente. Escolhemos o padrão de femtocélulas por se tratar de um modelo cada vez mais presente, embora ainda não seja bem conhecida no Brasil, e por se tratar de uma pequena estação rádio-base que comporta os equipamentos básicos de uma estação convencional.

1.3 OBJETIVOS

A tecnologia de femtocélula foi a escolhida para analisar como esses terminais de ambientes internos se comportam com a presença de uma rede interna e para comparar seu desempenho com o da rede de macrocélulas para esse tipo de demanda. Como essas células se assemelham as já existentes, é grande a possibilidade de sucesso de sua implementação para fornecer a cobertura para essas regiões menos privilegiadas. Com a utilização de uma femtocélula, esperamos conseguir resultados como:

- O provimento de cobertura em ambientes onde a rede macro possua um desempenho ruim ou ausente;
- Reduzir o tráfego da macrocélula e aumentar a sua capacidade, pois a estação rádio base deixará de consumir potência para cobrir os ambientes internos;
- Aumento de desempenho do enlace de rádio-frequência (transmissão com menos obstáculos), pois não haverá a necessidade de ultrapassar obstáculos como, por exemplo, paredes;
- Economia de potência por parte dos terminais móveis, pois há uma menor perda de percurso devido a proximidade da estação rádio-base.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O conceito de femtocélulas, por se tratar de um padrão, leva em consideração diversos aspectos que devem ser levados em consideração para a otimização do serviço. A fim de melhor visualizar todos os tópicos do trabalho, ele seguirá a seguinte estrutura, de acordo com a fundamentação teórica e procedimentos adotados.

- Capítulo 2: fornece uma breve introdução do conceito de femtocélulas, que é a tecnologia utilizada para o nosso propósito, além de diversas características e questões a serem levadas em conta.
- Capítulo 3: apresenta os cenários escolhidos para a implementação da nossa rede de femtocélula, pois a rede macro não provê uma cobertura ótima, o que compromete a comunicação. Também há a descrição de como as medições foram realizadas e os equipamentos utilizados com suas respectivas configurações.
- Capítulo 4: nele estão postados os resultados obtidos na medição do sinal da rede celular e da simulação do sinal da rede de femtocélula, apontando suas vantagens e justificando a necessidade de sua implementação.
- Capítulo 5: conclui o trabalho, ratificando o que foi explicitado nos capítulos anteriores, com ênfase na solução da cobertura desses ambientes internos e possíveis trabalhos futuros nesse campo.
- Referências: encontram-se todo o material que serviu de base para a fundamentação teórica e execução do referido trabalho.

Capítulo 2

FEMTOCÉLULA

2.1 INTRODUÇÃO

A femtocélula é uma célula que é instalada pelo cliente na sua casa ou no seu escritório. Ela possui todas as funcionalidades de uma célula comum, sendo conectada diretamente na Internet. Elas são limitadas em potência de transmissão e capacidade (até 20 dBm), com uma quantidade média de 3 a 4 usuários por célula. Por isso possuem pequena área de cobertura e são de baixo custo.

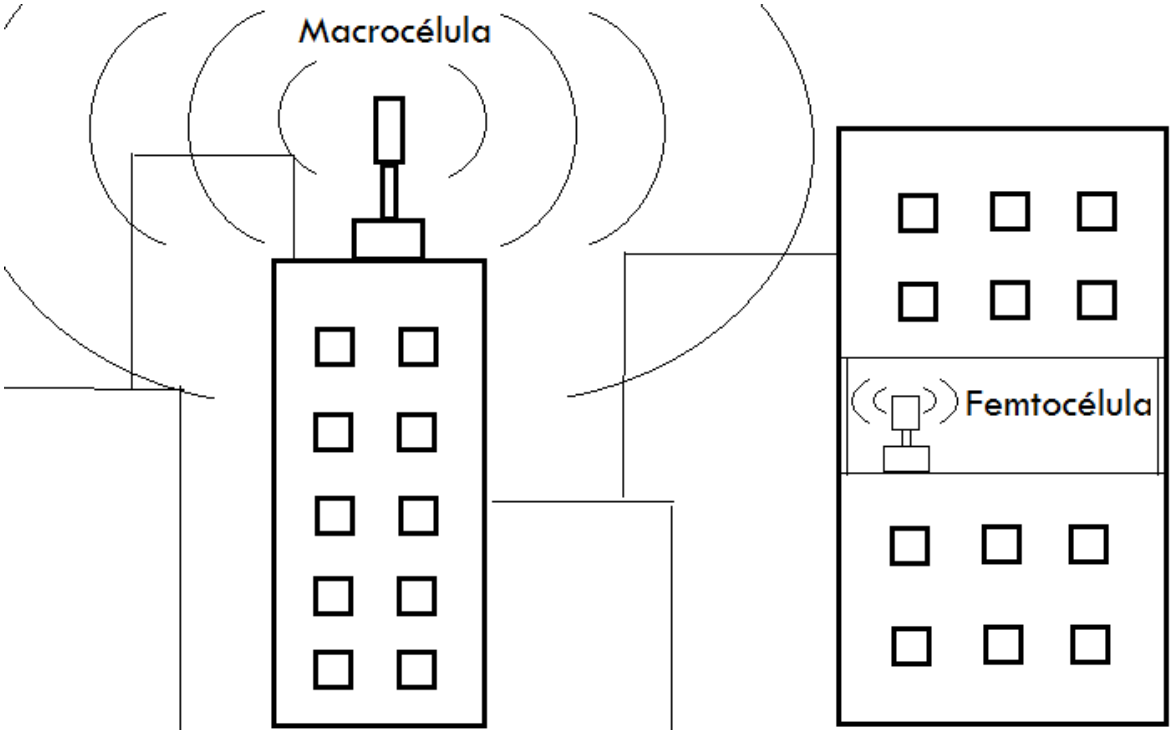

Figura 2.1 – Esquemático da localização de uma macro e de uma femtocélula

Embora aparentemente possam resolver todos os problemas relacionados a esse tipo de ambiente, as femtocélulas também possuem suas limitações, entre elas: problemas de interferência, segurança e acesso. Para entendermos um pouco melhor suas características, vamos abordar seus principais aspectos, a saber:

- Formas de acesso
- Interferência
- Controle de acesso
- Auto-organização
- Segurança

2.2 FORMAS DE ACESSO

Quando o assunto é acessibilidade, a femtocélula pode diferir bastante em comparação com as macrocélulas. O usuário responsável pela sua célula poderá limitar seu acesso apenas a usuários registrados ou autorizados por ele, mesmo se os outros utilizarem dos serviços da mesma operadora celular. Há três formas básicas de acesso à femtocélula que são [4]:

- Modo de acesso aberto: nesse modo qualquer usuário pode acessar a femtocélula, a qualquer momento e sem nenhuma restrição ou forma de preferência.
- Modo de acesso privado: nesse modo somente os usuários previamente inscritos para aquela femtocélula podem se conectar a ela; assim há uma autenticação para que se possa ser servido.
- Modo de acesso híbrido: nesse modo de acesso há prioridade a usuários previamente inscritos na femtocélula; assim há uma autenticação para se conectar com a femtocélula. Contudo, mesmo os não inscritos não serão impedidos de ser servidos caso haja canais disponíveis.

2.3 INTERFERÊNCIA

O desenvolvimento dessa tecnologia resulta em novos problemas quando implementada em conjunto com a arquitetura da rede de macrocélulas. Pode haver grande dificuldade para o receptor distinguir qual transmissor está se comunicando com ele num mesmo ambiente com diversos emissores, principalmente se estiverem operando nas mesmas faixas de frequência. Se não levados em consideração, essas femtocélulas podem criar "zonas mortas" na célula macro. Essas zonas mortas são áreas onde a relação portadora e interferência mais ruído (CINR) têm um valor muito baixo [5]. Assim, será impossível estabelecer uma comunicação por meio de qualquer femtocélula. Isso pode comprometer o serviço da rede em suas proximidades.

Por isso, é importante o conhecimento dos tipos de interferência que podem surgir nesse contexto e as soluções para o bom funcionamento da cobertura da rede. Existem diversos tipos de interferência a ser considerados, suas características e conceitos chave devem ser conhecidos e levados em consideração para sua otimização.

A maior parte da interferência de uma femtocélula é oriunda dos terminais de femtocélulas vizinhas, sendo a célula normalmente rodeada por vários componentes de interferência, e isolada deles somente por meio das paredes da casa. Assim, a potência de transmissão deve ser controlada pelo FAP de forma que satisfaça a CINR desejada para um determinado serviço, e também devem ser usadas técnicas de gestão de interferência [5].

A interferência entre camadas colaterais, ou interferência co-camada, é descrita como um sinal indesejado recebido em uma femtocélula oriundo de outra femtocélula. O nome co-comada se deve ao fato que essas células fazem parte do mesmo nível de camada, diferente de outros elementos, como estações base e *NodeBs*. Esse tipo de interferência ocorre principalmente entre vizinhos devido ao baixo isolamento entre casas e apartamentos.

Entre os problemas causados pela interferência co-camada, estão [5]:

No enlace reverso:

a) O aumento do nível de ruído no ponto de acesso, quando utiliza-se o CDMA;
b) Interferência entre portadoras no ponto de acesso, quando utiliza-se o OFDM.

No enlace direto:

a) Formação de buracos na cobertura;
b) Elevação do ruído pelos equipamentos dos usuários da Femtocélula, quando utiliza-se o CDMA.

Para tratar esses problemas, possíveis soluções são:

No enlace reverso:

a) Limitar e controlar a potência dos usuários da Femtocélula, no caso do CDMA;
b) Alocação inteligente de subcanais, no caso do OFDM.

No enlace direto:

a) Controle de potência adaptativo, no caso do CDMA;
b) Alocação inteligente de subcanais, no caso do OFDM.

Já a interferência entre camadas, ou cros-camada**,** é a interferência em que o agente agressor e a vítima permanecem em diferentes níveis de camada da rede, ou seja, um terminal conectado na femtocélula e outro na macrocélula. Esse tipo de interferência é um problema, principalmente quando é utilizado o protocolo CDMA nas duas camadas de rede, pois nesse caso ambos, femto e macrocélula, podem usar a mesma faixa de freqüência. Entretanto, isso não quer dizer que não haja problemas quando o protocolo OFDM é utilizado, conforme veremos a seguir.

Entre os principais problemas observados, temos:

No enlace reverso:

a) Aumento do nível de ruído no ponto de acesso e na estação base da rede macro, quanto utiliza-se o CDMA;
b) Interferência entre portadoras no ponto de acesso e risco de invalidação de subcanais da macrocélula, utilizando-se o OFDM.

No enlace direto:

a) Buracos na cobertura da femtocélula;
b) Buracos na cobertura interno e outdoor da macrocélula (CDMA) e inteferência entre portadoras dos usuários da macrocélula (OFDM).

Possíveis soluções são [6]:

Para o enlace reverso:

a) Limitação da potência dos usuários da femtocélula;
b) Alocação inteligente de canais ortogonais (OFDM).

Para o enlace direto:

a) Limitação e controle adaptativo da potência do ponto de acesso (CDMA);
b) Alocação inteligente de canais ortogonais (OFDM).

Existem diversas técnicas de cancelamento da interferência, seja no enlace reverso ou no direto. Contudo, devido a limitação de equipamento por parte dos terminais móveis, as técnicas de cancelamento de interferência não se aplicam muito bem ao enlace de descida. A mais promissora é o cancelamento de interferência de antena única, baseada numa filtragem adaptativa que utiliza somente uma antena, podendo aumentar a razão sinal-interferência + ruído (SINR) em até 15 dB [7].

Uma técnica para reparar os danos causados ao sinal pela interferência no enlace de subida é a filtragem, no qual o principal objetivo é proporcionar um filtro que atenua partes do espectro do sinal de entrada que são altamente afetados por interferências, ou seja, regiões do espectro com uma SINR muito baixa. Da mesma forma, as regiões do espectro onde a SINR é maior serão ampliadas [8].

Outra técnica empregada para o enlace de subida é a detecção de multiusuário, que é baseada no fato de que cada usuário possui uma certa assinatura ou forma de onda alocada. Uma vez que são focadas na recepção de sinais vindos de um grande número de usuários, essas técnicas são utilizadas exclusivamente em comunicações via *enlace reverso* realizadas na femtocélula ou na estação base. Sua operação consiste na utilização de um detector ótimo, que seleciona o sinal mais provável, com base nas observações e estatísticas do canal. Para tal, o detector calcula todas as correlações possíveis e escolhe o sinal que possuir a maior [9].

A principal desvantagem das técnicas de cancelamento de interferência é que elas são normalmente caras para se implementar, aumentando assim o custo da rede. Portanto a prevenção está sendo considerada como uma abordagem com maiores chances de sucesso.

2.4 CONTROLE DE ACESSO

Na macrocélula o controle de acesso ocorre quando o móvel solicita transmissão de dados ou quando faz uma atualização, mas para prevenir o uso não autorizado da femtocélula, o controle deve ocorrer sempre que o móvel tentar conectar-se a ela.

O controle de acesso deve ser acionado de duas formas na atualização. A cada femtocélula é atribuído um identificador diferente da Macrocélula. Assim o controle de acesso ocorre quando o móvel realiza mobilidade de entrada da célula maior para a menor. Assim, caso receba uma resposta negativa da requisição, não poderá conectar-se a ela. Para as que pertençam a uma mesma empresa, pode-se usar o mesmo identificador a fim de se evitar sinalizações desnecessárias [1].

Uma alternativa de controle de acesso é o acionamento quando é solicitada uma transmissão de dados pelo móvel. Quando não é permitido ao móvel se acessar a rede da femtocélula, ele será redirecionado para a macrocélula [11]. A desvantagem do uso dessa abordagem é que quando a macrocélula não estiver disponível haverá uma perda da conexão.

Outra forma de controle de acesso é a chamada *Access Control Location*, em que há, por exemplo, um comutador de femtocélula para femtocélula. Nessa abordagem, o controle de acesso ocorre durante o procedimento de registro do terminal móvel. O usuário faz uma solicitação para a femtocélula e esta, por sua vez, fará uma verificação junto ao comutador responsável, que por sua vez resolverá sobre o acesso do móvel requisitante [12].

A nível de macrocélula, as mensagens de *paging* são enviadas para todas as *Location Areas* (LAs), mas essas mensagens não podem ser enviadas para toda as femtocélulas da LA devido a sua quantidade potencialmente grande, o que poderia congestinar a rede. Para contornar esse conflito, a entidade gestora de mobilidade (MME) possui todas as listas de assinantes em grupos fechados (femtocélulas que não estão em aberto) de femtocélulas conectadas. Com essa lista, o *paging* ocorrerá somente em uma ou algumas de uma área.

2.5 AUTO-ORGANIZAÇÃO

A auto-organização é uma reação automática do sistema para efetuar reparos na rede, seja relacionada à alocação de frequência, configuração das antenas, medidas de *handover*, modulação adaptativa e controle de potência. Sua finalidade principal é a otimização dos serviços prestados pela rede.

As principais diretrizes desse quesito estão relacionadas às questões de instalação e manutenção das células. Com um sistema automatizado, não há necessidade de envio de uma equipe técnica para configuração do sistema. Também, não haverá necessidade de instalação de novos recursos para otimização da cobertura ou capacidade da rede. Por fim, com todas essas características atendidas, seria possível o desenvolvimento de um grande número de células. Algumas fases da auto-organização são:

- Medições em campo, onde há uma análise das características reais por meio da coleta de dados a fim de conhecer o comportamento da rede, e tomar as ações devidas. Essas medições são tomadas via múltiplos recursos, como contadores de rede, medições de nós vizinhos ou dos terminais móveis.
- Auto-configuração, em que procedimentos para prover o funcionamento da estações base no momento em que ela é ativada. Consistem dos procedimentos de configuração da lista de vizinhos, parâmetros de *handover* e definição de potência piloto.
- Auto-otimização, onde são tratados os procedimentos que visam a otimização da capacidade e da cobertura da rede e mitigação da interferência. Para tal, a célula realiza medições periódicas para ajuste dos algoritmos e parâmetros da estação base.
- Auto-reparo, fase em que são desenvolvidas as técnicas que resolvem o problema da perda de cobertura ou capacidade devido a falhas na rede, como danos nas estações base.

Os fatores que tornam as características de auto-organização da rede muito importantes são: a grande quantidade de femtocélulas com características distintas, o que torna inviável o gerenciamento delas por parte da rede macro da operadora; e a aptidão de seus usuários, sendo maior parte deles leigos no assunto, pois não possuem conhecimento de como configurar a sua estação base. Esse problema é resolvido pela configuração e atualização automática dos softwares responsáveis pelas questões de gerenciamento.

Os fatores que devem ser levados em consideração quando a femtocélula entra em operação são [10]:

- A atribuição de um identificador: a identificação será utilizada para registro e autenticação da célula junto à rede após sua ativação.
- Procedimentos de configuração automáticos: o cliente precisa apenas plugar a estação base numa fonte de potência e na Internet, não necessitando conhecer procedimentos de instalação ou configuração da célula, sendo esses procedimentos automáticos.
- Atualização de software via *download*: ela deve ser capaz de atualizar seu software fazendo o download das versões atualizadas automaticamente.
- Parâmetros de radiofrequência, onde a potência piloto e a máxima podem ser automaticamente calculadas a partir das informações da macrocélula providas pela operadora.
- Lista de vizinhos: empregam-se técnicas de sensoriamento do canal de rádio para estar ciente da presença de células vizinhas. Devem ser eficientes, a fim de manter sua cobertura e evitar interferência. A detecção dessas células vizinhas pode ser realizada via

escaneamento da interface aérea, troca de mensagens com os vizinhos, ou reportação de medições por parte dos terminais móveis ou rádio cognitivo.

2.6 SEGURANÇA

Quanto à segurança, alguns fatores devem ser levados em conta. Por exemplo, é importante a utilização de temporização para o estabelecimento do tempo absoluto e para garantir o alinhamento dos quadros, a fim de evitar interferência inter-simbólica. Sua precisão é em torno das partes por bilhão, o que representa um relógio bem confiável. Seu ajuste pode ser realizado junto ao *backbone*, com outras células ou com outros recursos como GPS [1].

É necessário que a informação seja transportada com segurança para evitar operações maliciosas. A conexão é mais segura quando a célula opera no modo restrito à conexão, pois somente os usuários inscritos podem se conectar. As partes mais vulneráveis da rede são a Internet, e o enlace wireless entre a femtocélula e o móvel, que inclui o ponto de acesso e a rede do usuário. Os métodos mais comuns que podem ser empregados para reduzir ou eliminar os potenciais riscos são [1]:

- IPsec, em que há garantia da segurança ,e autenticação na Internet. Onde os dados ou o pacote são criptografados.
- *Femtocell Secure Authentication*, em que são permitidas somente a conexão de usuários válidos.
- Proteção do enlace wireless, onde há medidas de cobertura para garantir o não rastreamento do canal (controle de potência e radiação).

Em vários casos, é necessário saber a atual localização da femtocélula. Caso contrário, se tornaria inviável a transmissão e recepção de dados por parte dela. Procedimentos que podem ser utilizados para determinar sua localização são: o emprego de GPS na estação base, sensoriamento da célula, endereçamento IP, sinal de TV e o endereçamento dos seus clientes.

2.7 CONCLUSÕES

Nesse capítulo foram abordadas as principais características de uma femtocélula, como questões relacionadas ao acesso à célula, a interferência com outras células e sua auto-organização. Vimos suas configurações técnicas, apontamos vantagens e desvantagens para provimento de cobertura interna e, por último, especificamos o que pode ser realizado a fim de minimizar problemas causados pela interferência.

Capítulo 3

MEDIÇÕES EM CAMPO

No presente capítulo encontram-se os locais escolhidos para a possível instalação de uma femtocélula. Neles, foram realizadas medições em campo, com configurações de transmissão relativas à célula a ser implementada.

Em cada ambiente, realizamos, primeiramente, a medição do nível do sinal da rede celular, que é o ponto de partida do nosso projeto. Com isso, justificamos a necessidade de instalação de uma femtocélula a fim de prover a cobertura ótima nesses lugares. Depois, iniciamos os procedimentos para realizar a geração e captura do sinal da nossa rede. Para caracterizar a femtocélula, foi gerado um sinal de RF em onda contínua por meio de um sistema transmissor estático e a coleta desse sinal por um receptor móvel.

De início, há uma breve descrição dos equipamentos utilizados nas medições, com suas respectivas configurações, que foram escolhidas para a geração do sinal de acordo com os modelos existentes de padrões de femtocélulas. A seguir, encontram-se a descrição dos ambientes escolhidos e explorados, com os devidos procedimentos adotados para a medição dos sinais.

3.1 SISTEMAS DE MEDIÇÃO

Para a realização das medições, foram implementados um sistema de transmissão e outro de recepção, ambos localizados no ambiente interno.

Os equipamentos utilizados pelo sistema transmissor estão descritos a seguir. Primeiro encontram-se as especificações dos ambientes transmissor e receptor e, por fim, o aparelho utilizado para a medição do nível do sinal da rede celular.

3.1.1 Sistema transmissor

Eis uma breve descrição dos componentes do sistema transmissor com suas respectivas configurações que foram adotadas.

3.1.1.1 Antena omnidirecional

As antenas utilizadas para a realização tanto da transmissão quanto da recepção são do tipo omnidirecional e possuem ganho de 12 dBi. Suas faixas de operação estão na faixa de 2,5 GHz a 2,6 GHz.

Figura 3.1 – Antena (2,5GHz a 2,6 GHz) e cabo

3.1.1.2 Analisador de rede

Trata-se de um equipamento que possui diversas funções, tanto para geração quanto para recepção de um sinal de RF. Foi escolhido para a transmissão do sinal devido a sua portabilidade e a possibilidade de geração de sinal em onda contínua, que é o bastante para o nosso experimento.

Figura 3.2 – Analisador de rede

Para gerar a portadora, utilizamos a função de geração de onda contínua com frequência constante de 2,5 GHz e 0 dB de atenuação. O sinal gerado possui cerca de 7 dBm de potência, que é a potência padrão gerada pelo analisador. Como esta operando como um elemento transmissor, a antena deve ser conectada na porta de saída do aparelho.

3.1.2 Sistema receptor

Aqui encontra-se a especificação dos elementos que compõem o sistema receptor do sinal interno, em referência a femtocélula.

3.1.2.1 Analisador de espectro

Esse equipamento possui diversas funções de análise e processamento de sinais, tanto ondas de RF como via cabeamento. Ele foi escolhido por atender a todos os requisitos necessários para a captura do sinal, pois atua na faixa de frequência adotada e, posteriormente, envia o sinal para a placa de aquisição de dados por meio de uma saída analógica.

Figura 3.3 – Analisador de espectro

As configurações escolhidas foram:

- Frequência da portadora de 2,5 GHz
- Frequência de *span* de 0 Hz
- *Sweep time* de 15 ms
- VBW de 30 Hz
- RBW de 10 kHZ

A frequência central possui tal valor devido às frequências de recepção e transmissão dos sistemas. Com o *span* em 0 Hz, o analisador funciona como um osciloscópio, permitindo a medição da potência instantânea da onda. O *sweep time* escolhido é o menor valor possível fornecido pelo equipamento, que fornece um segmento de reta representando o sinal, pois não há tempo suficiente para oscilações no seu nível antes dele ser traçado por completo. Por fim, o VBW e o RBW ajustam os sistemas de filtragem; valores baixos reduzem a largura dos filtros, o que resulta num menor nível de ruído. Contudo, a frequência central pode sofrer alterações devido a mudanças de temperatura. Os valores adotados estão relacionados com os valores de potência que o equipamento é capaz de medir [17].

3.1.2.2 Antena omnidirecional

A antena empregada na recepção do sinal interno possui as mesmas características da utilizada na transmissão, que foi especificada anteriormente.

3.1.2.3 Placa de aquisição de dados

A placa de aquisição de dados funciona como um conversor analógico-digital do sinal recebido, pois ela recebe os dados analógicos capturados pelo analisador de espectro e, após processá-lo, o envia para a porta serial universal (USB) do *notebook*.

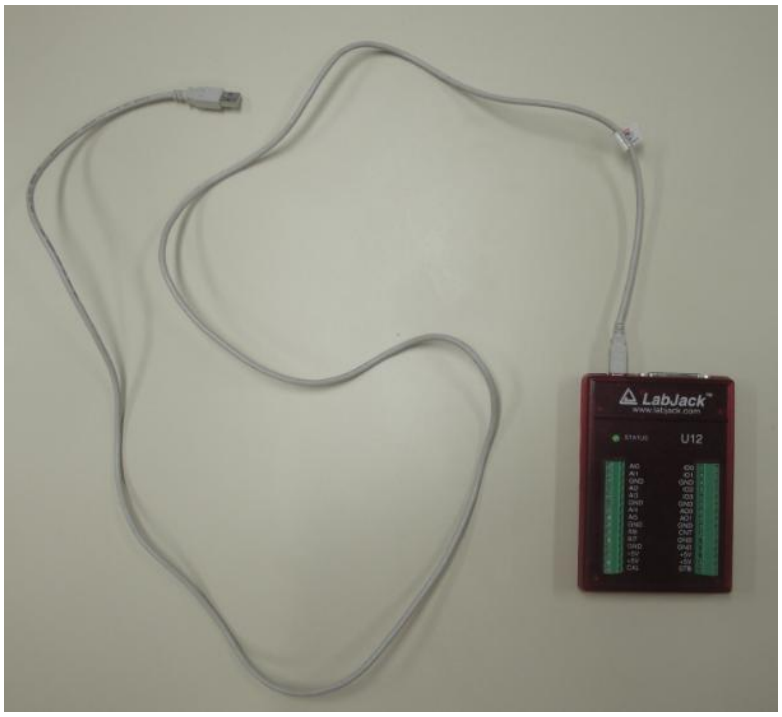

Figura 3.4 – Placa de aquisição de dados

Para a obtenção dos dados no notebook, é necessária a utilização do software de funcionamento da placa, que é fornecido no sítio do fabricante. Esse programa também permite a configuração da taxa de amostragem do sinal. Foi adotado o valor de 300 amostras por segundo, que é a maior taxa permitida.

O programa, após receber os dados digitais da placa, os armazena em um arquivo. Os dados são os valores de tensão na saída de vídeo analógica do analisador de espectro, que está relacionada com a potência do sinal recebido. Para a obtenção de tais valores, foram

realizadas cerca de 70 medições de bancada a fim de obter uma curva que relaciona os dados de potência com os valores de tensão. A fórmula obtida foi uma equação do primeiro grau, descrita a seguir:

$$P = 77{,}41*V - 73{,}81,$$

sendo P a potência recebida pelo analisador de espectro, em dBm, e V a tensão de saída do analisador de espectro.

Para seu cálculo utilizamos a função *Curve Fitting* do programa MATLAB e foi utilizado o método de regressão linear com intervalo de confiança de 95%, conforme podemos visualizar no gráfico a seguir.

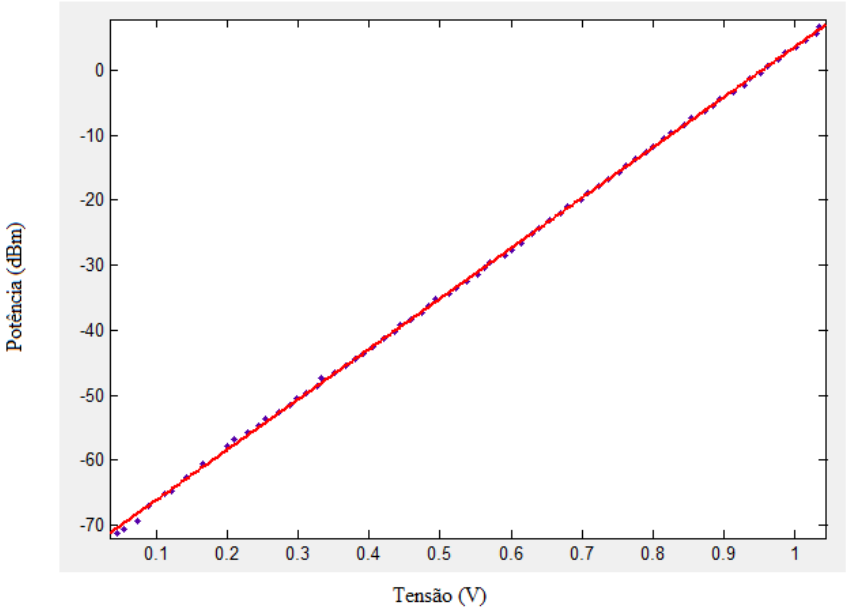

Figura 3.5 – Curva aproximada dos valores obtidos de potência e tensão

3.1.2.4 Notebook

Utilizado em conjunto com a placa de aquisição de dados e seu software, no qual postamos a equação que relaciona tensão e potência e sua taxa de amostragem.

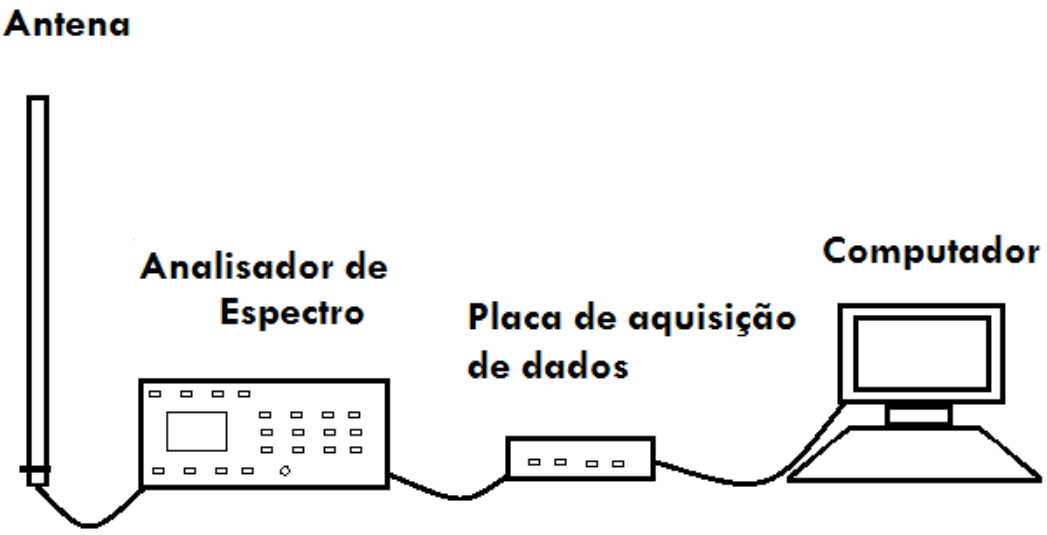

Figura 3.6 – Esquemático do sistema receptor

3.1.3 Medição do sinal da rede celular

A fim de obtermos uma medida mais precisa do nível do sinal oferecido pela rede celular, utilizamos um aparelho modelo *smartphone* que utilizava o sistema operacional Android. Com isso, foi possível a utilização de um aplicativo chamado Sinal GSM Monitor, que mostra a potência instantânea oferecida pela ERB local.

Figura 3.7 – Logo do aplicativo

Figura 3.8 – *Smartphone* utilizado

3.2 CONFIGURAÇÕES DA FEMTOCÉLULA

A femtocélula simulada no nosso trabalho teve como base as especificações de RF do 3GPP [13], também encontradas em [2].

Bandas de frequências	Enlace reverso: 2500-2570 MHz Enlace direto: 2620-2690 MHz
Potência de transmissão	Até 10 dBm
Altura da antena em relação ao solo	2 metros

Tabela 3.1 – Configurações da femtocélula

Essa é uma das possíveis faixas de frequência e potência que podem ser adotadas. Essas especificações foram escolhidas devido à disponibilidade do equipamento no laboratório para a simulação de uma femtocélula.

3.3 AMBIENTES DE MEDIÇÃO

Nesse tópico encontram-se os locais escolhidos para a realização das medições. Tratam-se basicamente de ambientes com pouca ou nenhuma linha de visada, sendo alguns localizados no subsolo, o que compromete a qualidade da cobertura da rede núcleo nesses ambientes. Os locais escolhidos são:

- Ambiente 1: Biblioteca Central da UnB (BCE);
- Ambiente 2: Corredor da Ciência da Computação (CIC) no ICC;
- Ambiente 3: Estação da 114 Sul do Metrô-DF.

Em todos os locais, os sistemas de transmissão e recepção utilizaram as mesmas especificações, que foram mostradas anteriormente. A antena transmissora esteve numa altura de aproximadamente 2 metros em relação ao solo, assim como a antena receptora. O deslocamento do transmissor foi realizado numa velocidade aproximadamente constante, que foram especificadas no tópico anterior. A fim de controlar a velocidade do passo, foi utilizado um metrônomo e foram seguidas as marcações das lajotas presentes no piso dos ambientes.

Em cada cenário foram realizadas duas medições, sendo uma de afastamento e outra de aproximação do sistema transmissor em relação ao receptor. Assim, obtemos medidas mais precisas, que descrevem melhor os comportamentos do sinal em cada situação.

3.3.1 Ambiente 1: Biblioteca Central da UnB (BCE)

A BCE possui diversos pontos em que o sinal da rede núcleo é muito fraco. Isso se deve a estrutura do prédio, que é em concreto armado, e a presença de obstáculos, como mesas e estantes, que configura um ambiente com multipercursos.

O sistema receptor foi montado junto a parede de um dos corredores no subsolo da Biblioteca, num local com diversas estantes localizadas em ambos os lados do corredor. O terminal móvel transmissor se locomoveu de forma paralela em relação ao corredor com velocidade constante, controlada com o auxílio de um metrônomo para regular o passo, para caracterizar a mobilidade.

Figura 3.9 – Corredor entre estantes na BCE

Figura 3.10 – Final do corredor

3.3.2 Ambiente 2: Corredor da Ciência da Computação (CIC) no ICC

Esse cenário é basicamente um longo corredor fechado sem muitos obstáculos em seu percurso. Como localiza-se no subsolo e não possui janelas, é um local onde o sinal da rede é bem prejudicado, sendo bem difícil de se realizar ligações celulares.

O sistema receptor foi montado junto a uma porta lacrada, no final do corredor, a fim de obter uma aferição envolvendo a extensão máxima possível, caracterizando assim a mobilidade do terminal transmissor.

Figura 3.11 – Na metade do corredor do departamento da CIC

Figura 3.12 – Sistemas transmissor e receptor junto a porta lacrada

3.3.3 Ambiente 3: Estação da 114 Sul do Metrô-DF

O último cenário escolhido também é um local onde o sinal é bastante prejudicado devido ao concreto armado de grande espessura que envolve a estação, o que representa um forte obstáculo para o sinal. O espectro também pode sofrer com multipercursos devido à passagem das locomotivas e ao fluxo de pessoas, principalmente nos horários de pico.

A antena de recepção desse sinal foi postada no portal de entrada à plataforma, pois trata-se do ponto intermediário entre os extremos do corredor de acesso aos vagões da locomotiva.

Figura 3.13 – Entrada do corredor da estação

Figura 3.14 – Metade do corredor da estação

3.4 PROCEDIMENTOS DE MEDIÇÃO

A metodologia de medição adotada foi a mesma em cada um dos cenários. Primeiramente, foram capturadas amostras do nível do sinal de RF da rede celular para justificar o desempenho aquém do esperado dessa rede para esses tipos de ambiente. Depois, foram montados os sistemas de transmissão e recepção para a caracterização do ambiente interno, numa representação de uma femtocélula. Por fim, foram aferidos os sinais em função da movimentação do usuário, para caracterizar a mobilidade.

3.5 CONCLUSÕES

Neste capítulo, tivemos uma breve apresentação dos sistemas de medição, com seus respectivos equipamentos, e os ambientes que foram alvo do referido trabalho. Inicialmente, foram especificados os elementos que compõem os sistemas transmissor e receptor. Vale ressaltar que todos os ambientes têm como características a ausência de linha de visada, em relação a rede celular, e forte presença de multipercursos. Depois, foram designados os sistemas de transmissão e recepção em cada um dos locais fechados explorados. Por fim, encontram-se figuras dos ambientes explorados, com suas respectivas características.

Capítulo 4

Resultados

Após a especificação sucinta dos equipamentos, sistemas de transmissão e recepção e dos ambientes de medição, e posterior aferição dos dados, houve a necessidade de tratá-los de forma a permitir uma correta análise do seu comportamento de acordo com o tipo de ambiente. Para conseguir chegar nos dados finais, foi necessário seguir alguns procedimentos descritos mais adiante.

A análise dos dados finais foi realizada tomando como base os modelos teóricos de PDFs, amplamente encontrados na literatura, cada um aplicando-se melhor para determinado tipo de ambiente, de acordo com suas características. Foram utilizadas técnicas para calcular o desvio dos sinais empíricos em relação aos modelos teóricos com o auxílio do programa computacional MATHEMATICA, bem como o cálculo das respectivas PDFs e CDFs e das funções de autocorrelação.

A seguir, estão postados os procedimentos, de acordo com a evolução do tratamento dos sinais, desde o sinal bruto adquirido no ato de coleta dos dados até a elaboração dos desvios e das curvas das ACFs.

4.1 NÍVEL DO SINAL DA REDE CELULAR

A fim de comprovarmos que o sinal da rede macro não possui um nível que permita uma comunicação desejável, obtivemos algumas amostras do nível desse sinal com a utilização do aparelho celular modelo *smartphone* e um aplicativo, conforme ilustrado no Capítulo 3.

Para uma aferição realista, os dados foram obtidos em alguns pontos dentro do ambiente, para mostrar com mais precisão a grande variação que o sinal da rede sofre nesses locais, o que torna a comunicação bastante ruim ou até mesmo inviável.

Os valores de potência obtidos são relativos às medições instantâneas que o terminal móvel realiza, de acordo com sua análise do canal de RF. Os valores em dBm fazem referência a essas medições.

A seguir, encontram-se algumas fotos obtidas diretamente do aparelho celular. Com o auxílio do aplicativo, ficaram evidentes as variações do nível do sinal.

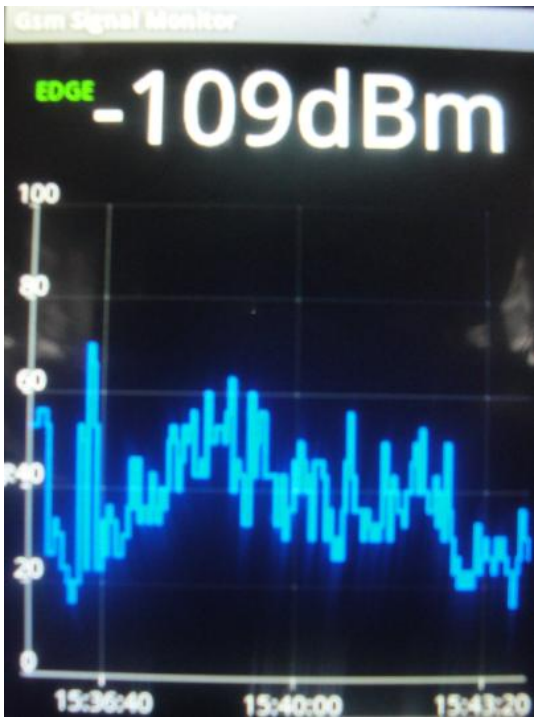

Figura 4.1 – Nível do sinal celular no ambiente 1

O sinal obtido, conforme observado na figura anterior, foi de uma potência considerada ínfima para uma boa comunicação utilizando a rede celular, seja por voz ou dados. O gráfico representa a oscilação da potência do sinal em função da hora em que foi medida. O sinal é tão fraco que em alguns pontos ele passou despercebido pelo aparelho celular, conforme ilustrado na figura a seguir.

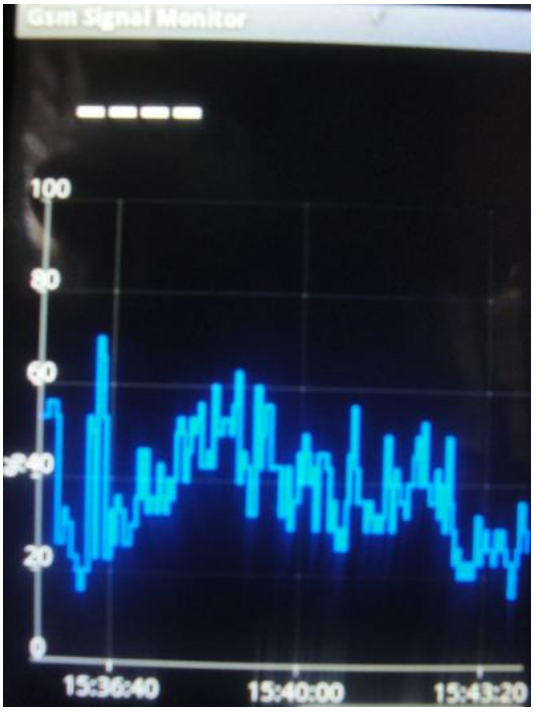

Figura 4.2 – Sinal da rede celular ausente

4.2 DADOS RELATIVOS ÀS MEDIÇÕES

Aqui encontram-se dados importantes que caracterizam como foram realizadas as medições e dados básicos sobre o sinal transmitido e recebido. Também temos o tamanho da janela de dados para o cálculo do desvanecimento rápido com o auxílio da função *Moving Average* do programa computacional MATHEMATICA.

Ambiente	1 - BCE	2- CIC	3- Metrô
Distância percorrida (metros)	44,17	37	32,32
Frequência da portadora (GHz)	2,5	2,5	2,5
Velocidade de afastamento (metros/segundo)	0,78	0,80	0,86
Velocidade de aproximação (metros/segundo)	0,83	0,83	0,91
Comprimento de onda (metros)	0,12	0,12	0,12
Janela no percurso de afastamento (nº de amostras)	2054	2014	1871
Janela no percurso de aproximação (nº de amostras)	1944	1941	1771
Taxa de amostragem (amostras/segundo)	300	300	300

Tabela 4.1 – Dados relativos às medições

4.3 SINAIS EMPÍRICOS

Nas medições realizadas em campo, os dados foram obtidos com uma taxa constante de 300 amostras por segundo. Todas essas amostras representam uma parte do sinal recebido, que foi reconstruído com a ajuda do programa MATHEMATICA. Após sua remontagem, podemos obter os efeitos de desvanecimento, seja de larga ou de pequena escala, que estão adicionados ao sinal recebido. Por isso, se fez necessária sua repartição nesses componentes a fim de facilitar nossa análise dos efeitos de campo, para posterior comparação com os modelos teóricos de PDF, CDF e ACF.

Abaixo, encontram-se os gráficos relativos ao desvanecimento lento obtidos a partir dos dados coletados nas campanhas de medição. Para cada cenário, foi obtida a variação do sinal, em dBm, para o percurso de afastamento e de aproximação dos terminais, em velocidade constante. As variações estão em função do tempo, em segundos. Portanto, nos percursos de aproximação, o nível do sinal começa baixo na origem e cresce ao longo do tempo.

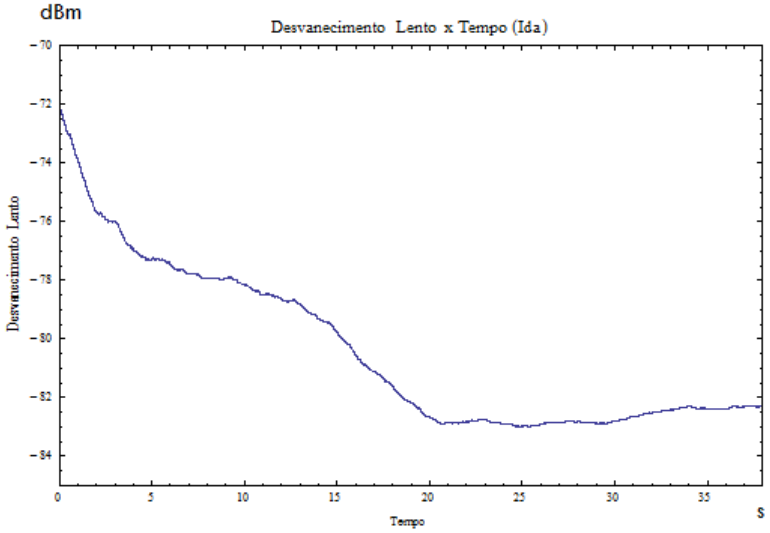

Figura 4.3 – Desvanecimento lento no percurso de afastamento no Ambiente 1

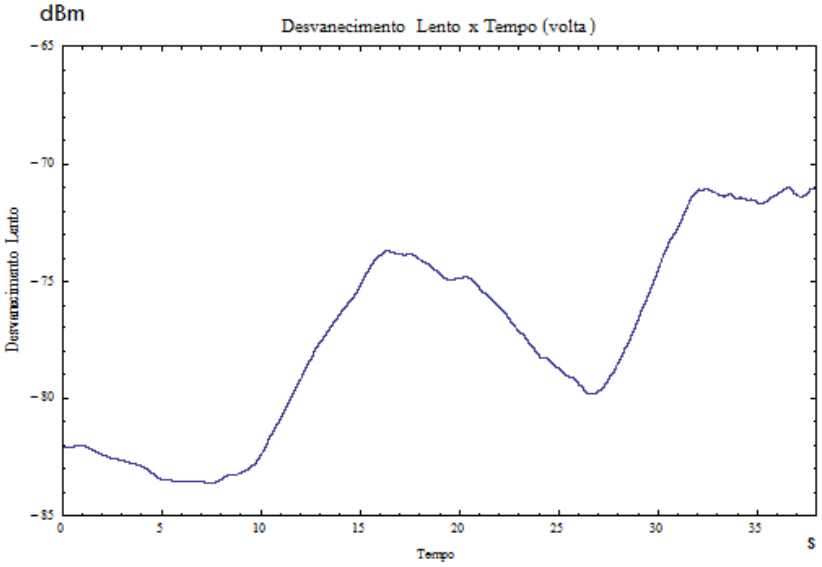

Figura 4.4 – Desvanecimento lento no percurso de aproximação no Ambiente 1

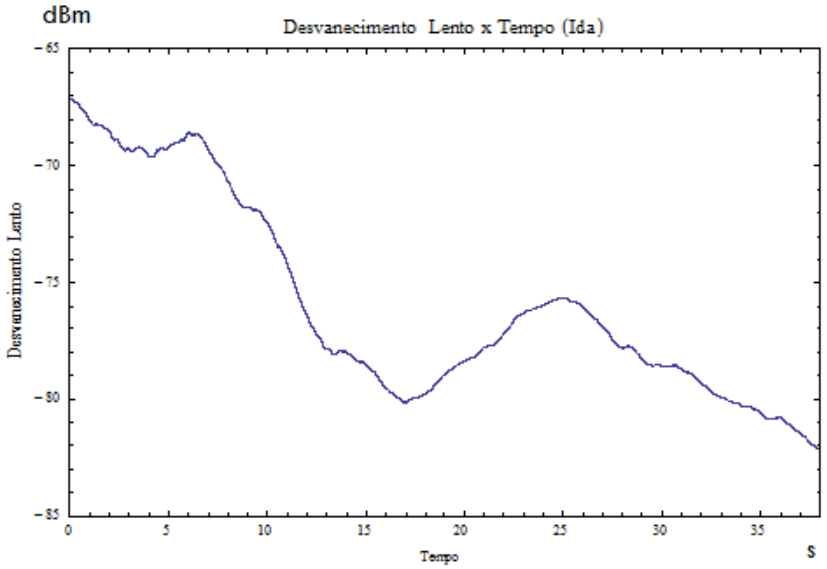

Figura 4.5 – Desvanecimento lento no percurso de afastamento no Ambiente 2

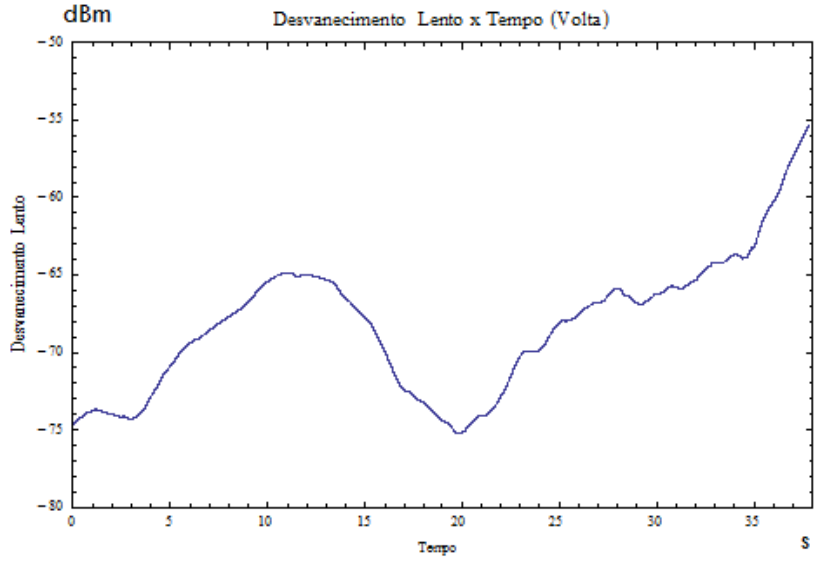

Figura 4.6 – Desvanecimento lento no percurso de aproximação no Ambiente 2

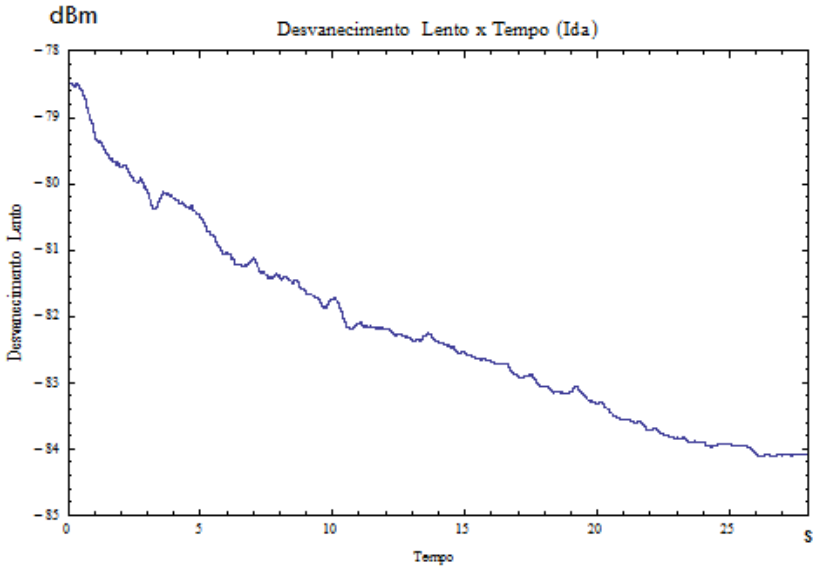

Figura 4.7 – Desvanecimento lento no percurso de afastamento no Ambiente 3

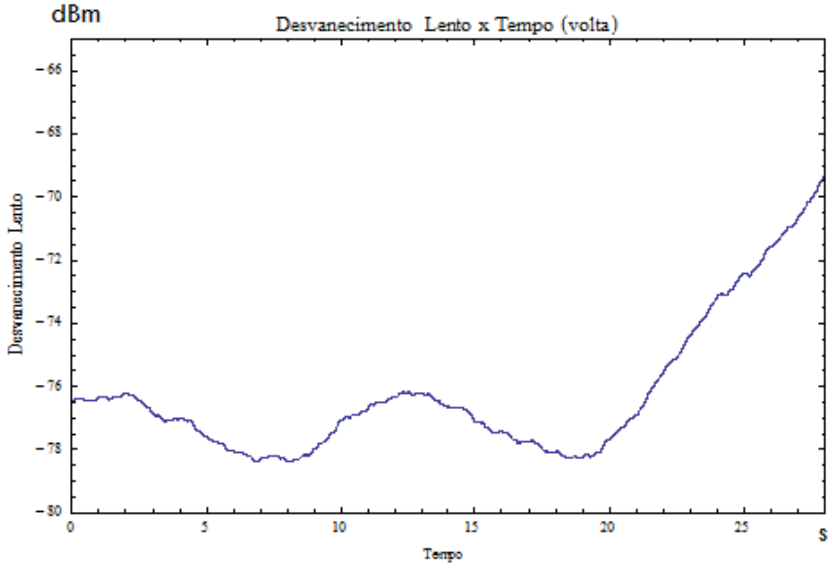

Figura 4.8 – Desvanecimento lento no percurso de aproximação no Ambiente 3

A seguir, foram realizados os processamentos necessários a fim de obter os valores empíricos das PDFs e CDFs, bem como as ACFs.

4.4 ESTATÍSTICAS DE PRIMEIRA ORDEM

Aqui serão apresentados todos os resultados obtidos quanto as estatísticas de primeira ordem, ou seja, as funções de densidade de probabilidade e as funções de distribuição cumulativa extraídas a partir dos sinais recebidos em cada um dos ambientes.

Os valores obtidos de acordo com os dados empíricos são comparados com três formulações teóricas, os modelos de Rayleigh, Rice e Nakagami. Essa análise é realizada para saber qual dos modelos melhor se ajusta as características de cada um dos ambientes. As formulações podem ser encontradas em [17].

A envoltória normalizada ρ é calculada como:

$$\rho = \frac{r}{\Omega}$$

Em que *r* é a envoltória do sinal e Ω é a potência média.

A PDF de Rayleigh é expressa por:

$$\text{PDF Rayleigh} = 2\rho \text{Exp}[-\rho^2]$$

Já a CDF de Rayleigh é dada por:

$$\text{CDF Rayleigh} = 1 - \frac{\text{Gamma}[1, \rho^2]}{\text{Gamma}[1]}$$

A PDF de Rice é expressa por:

$$\text{PDF Rice} = \frac{2(1+k)\rho}{\text{Exp}[k]} * \text{Exp}[-(1+k)\rho^2]\text{BesselI}[0, 2\sqrt{k(k+1)}\rho]$$

Já a CDF de Rice é dada por:

$$\text{CDF Rice} = 1 - \text{MarcumQ}[1, 2\sqrt{k}, 2\sqrt{2(k+1)}\rho]$$

A PDF de Nakagami é expressa por:

$$\text{PDF Nakagami} = \frac{2m^m \rho^{2m-1}}{\text{Gamma}[m]\text{Exp}[m * \rho^2]}$$

Já a CDF de Nakagami é dada por:

$$\text{CDF Nakagami} = 1 - \frac{\text{Gamma}[m, m * \rho^2]}{\text{Gamma}[m]}$$

Na tabela a seguir encontram-se os parâmetros de desvanecimento utilizados em cada um dos modelos. Esses parâmetros foram obtidos com base nos dados empíricos obtidos nas campanhas de medição, o que torna a elaboração das estatísticas mais realista.

Parâmetros	k-Rice	m-Nakagami
Ambiente 1	0,44049	2,27019
Ambiente 2	0,65682	1,52247
Ambiente 3	0,40508	2,46865

Tabela 4.2 – Parâmetros estimados

Finalmente, encontram-se os gráficos das PDFs e CDFs. Em cada imagem estão plotadas as estatísticas referentes a um dos ambientes, sendo o percurso de afastamento ou de aproximação em relação ao sistema receptor. Na mesma figura encontram-se os valores referentes aos dados empíricos e os modelos teóricos, de acordo com os parâmetros especificados na tabela anterior. Com isso, podemos observar qual desses modelos melhor se adéqua às características dos ambientes em questão.

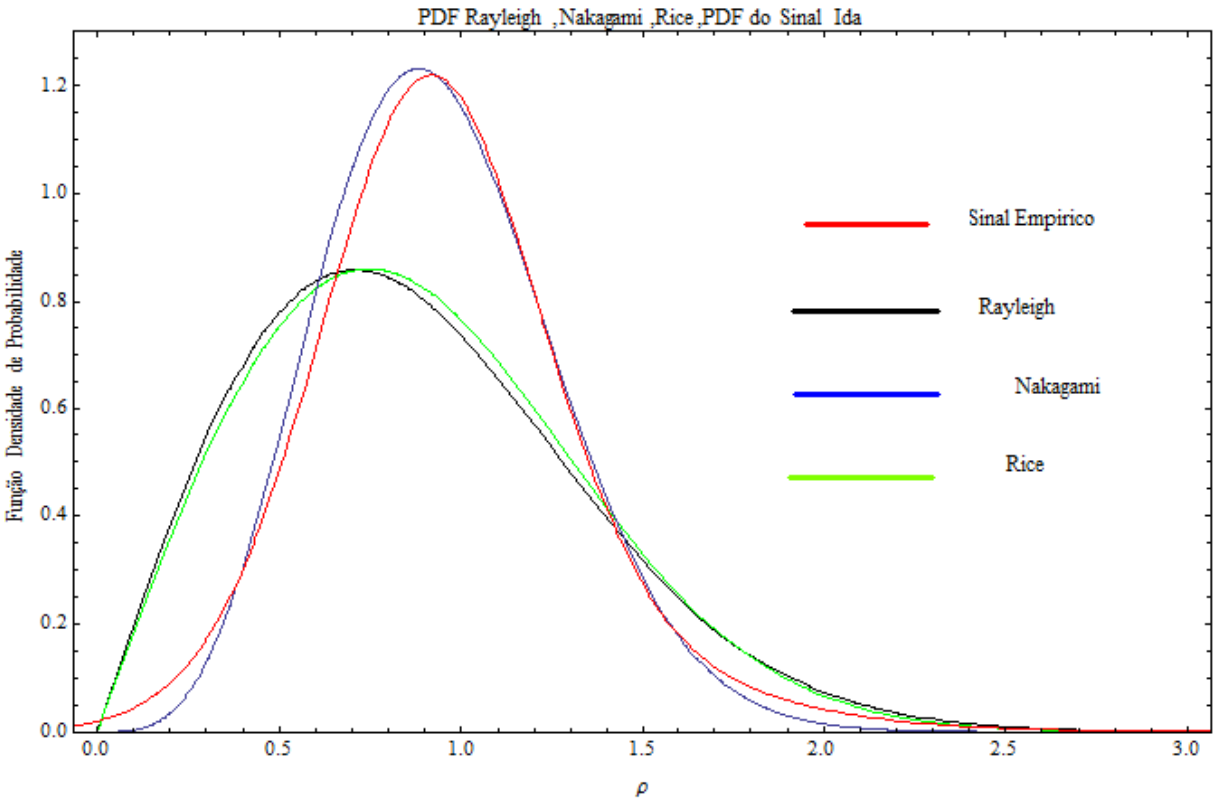

Figura 4.9 – PDFs dos sinais empírico e teóricos no Ambiente 1 quando o móvel se afasta do receptor

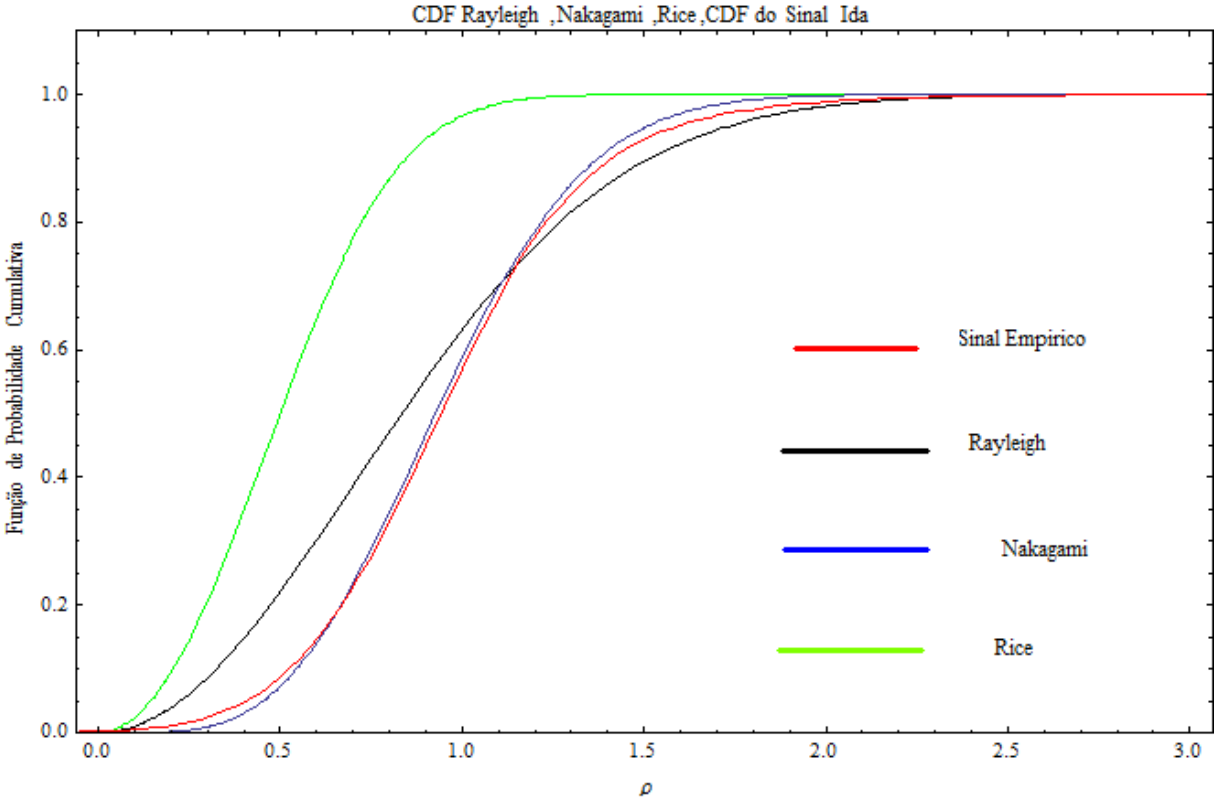

Figura 4.10 – CDFs dos sinais empíricos e teóricos no Ambiente 1 quando o móvel se afasta do receptor

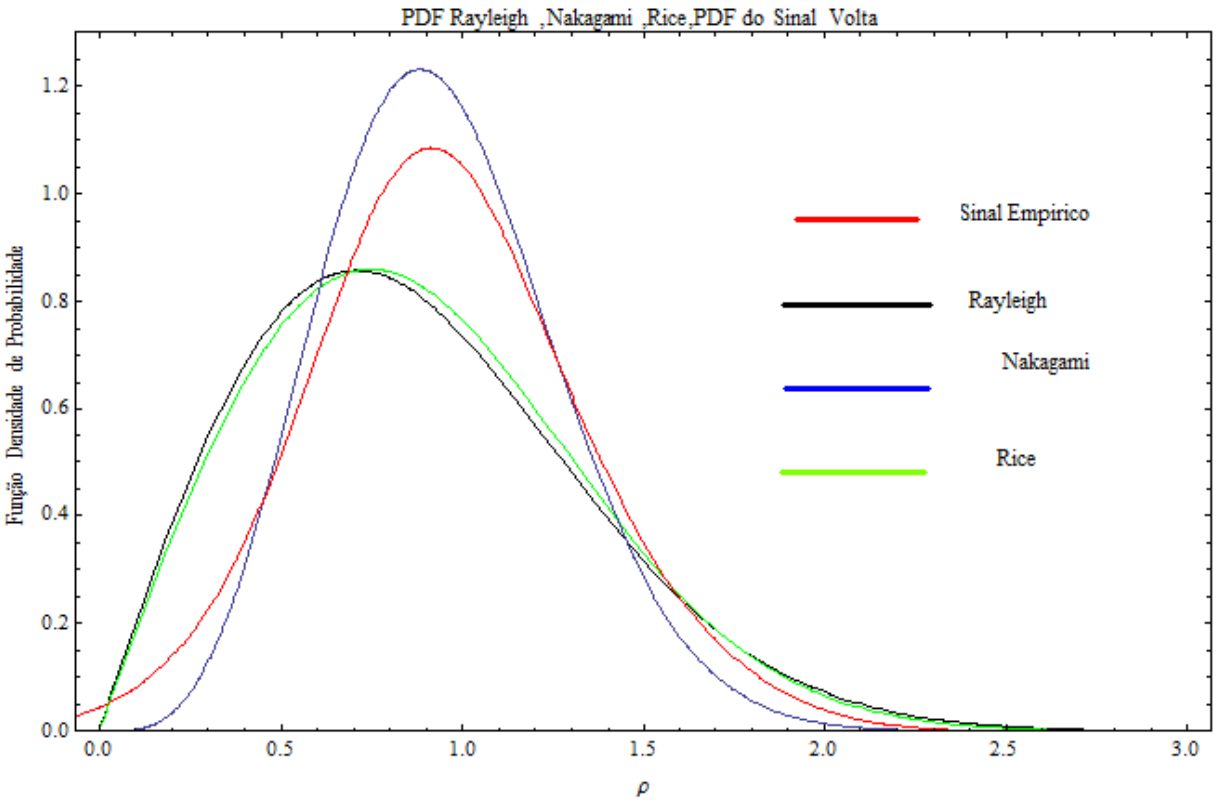

Figura 4.11 – PDFs dos sinais empírico e teóricos no Ambiente 1 quando o móvel se aproxima do receptor

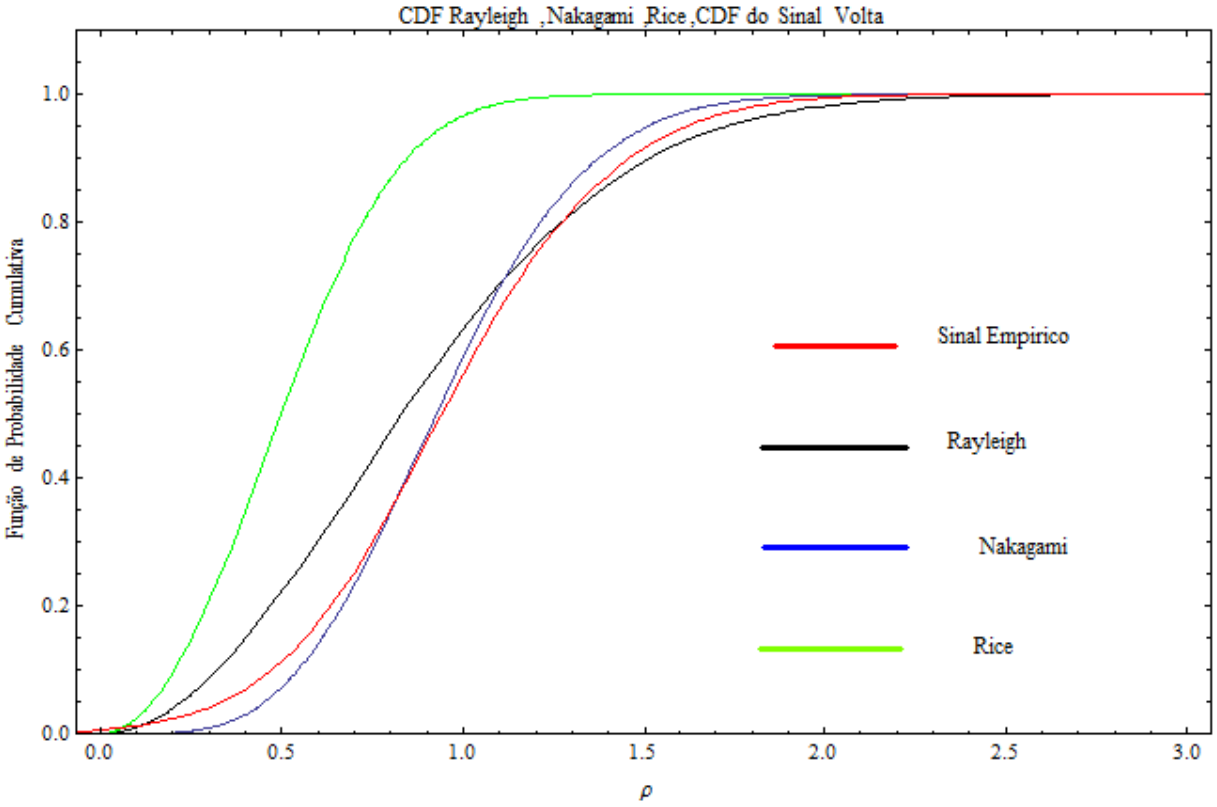

Figura 4.12 – CDFs dos sinais empírico e teóricos no Ambiente 1 quando o móvel se aproxima do receptor

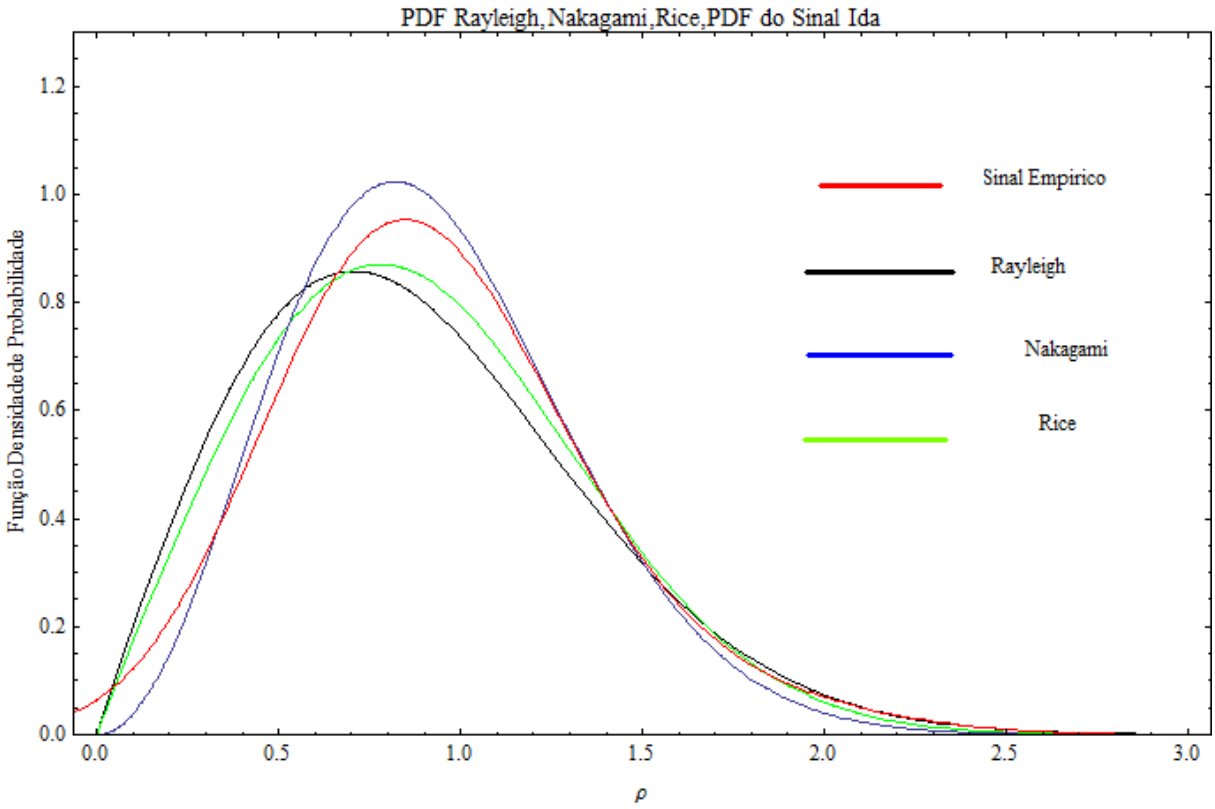

Figura 4.13 – PDFs dos sinais empírico e teóricos no Ambiente 2 quando o móvel se afasta do receptor

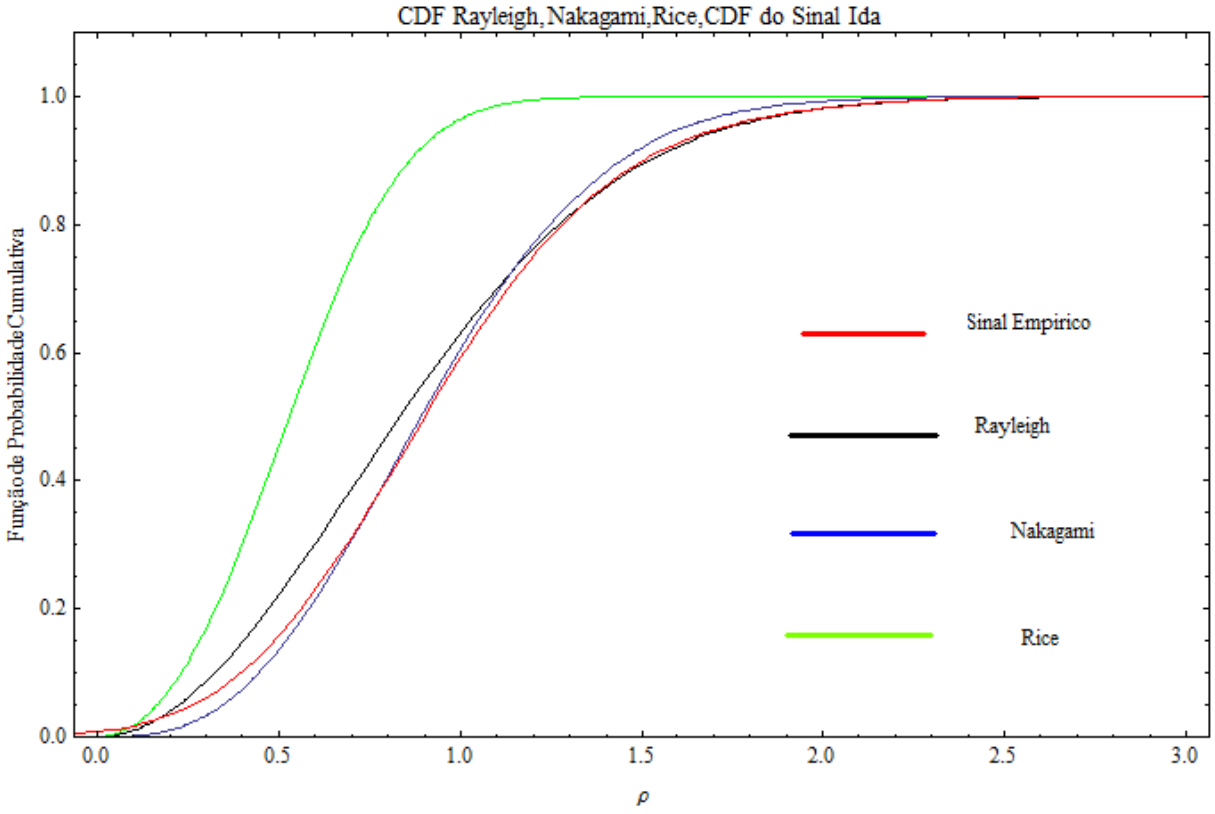

Figura 4.14 – CDFs dos sinais empírico e teóricos no Ambiente 2 quando o móvel se afasta do receptor

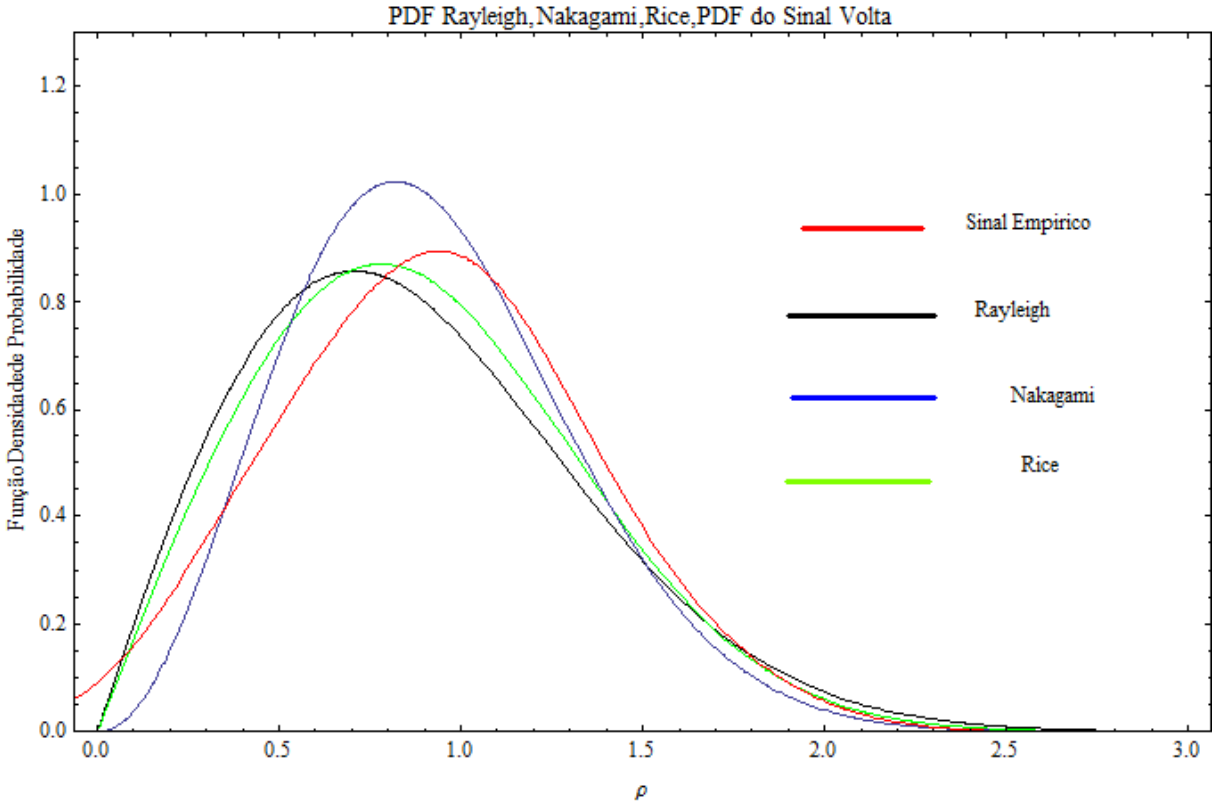

Figura 4.15 – PDFs dos sinais empírico e teóricos no Ambiente 2 quando o móvel se aproxima do receptor

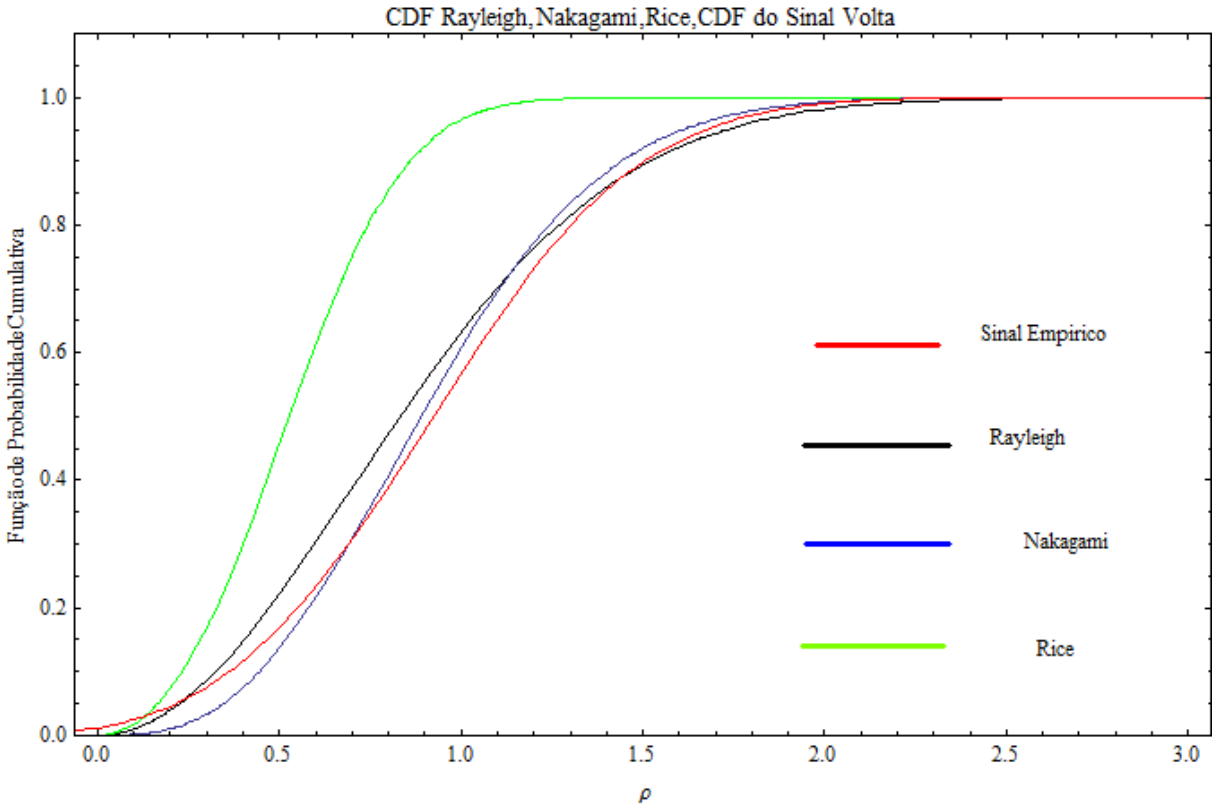

Figura 4.16 – CDFs dos sinais empírico e teóricos no Ambiente 2 quando o móvel se aproxima do receptor

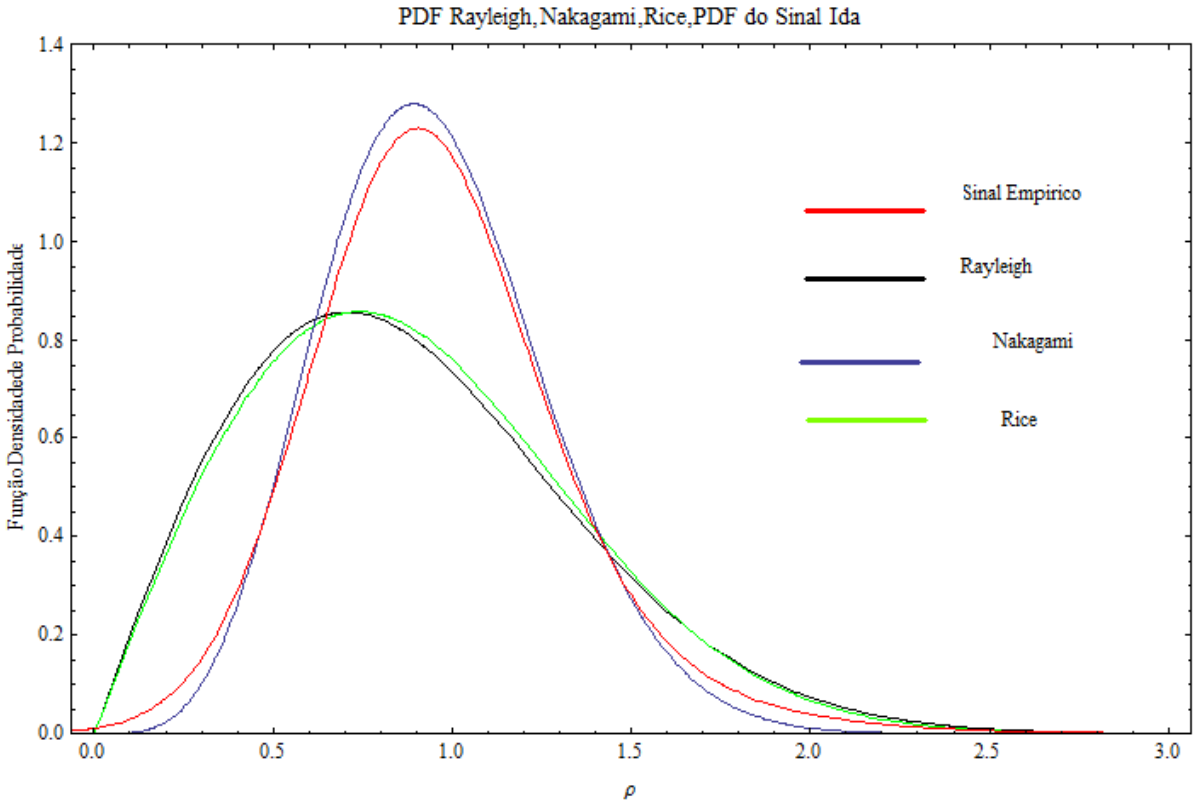

Figura 4.17 – PDFs dos sinais empírico e teóricos no Ambiente 3 quando o móvel se afasta do receptor

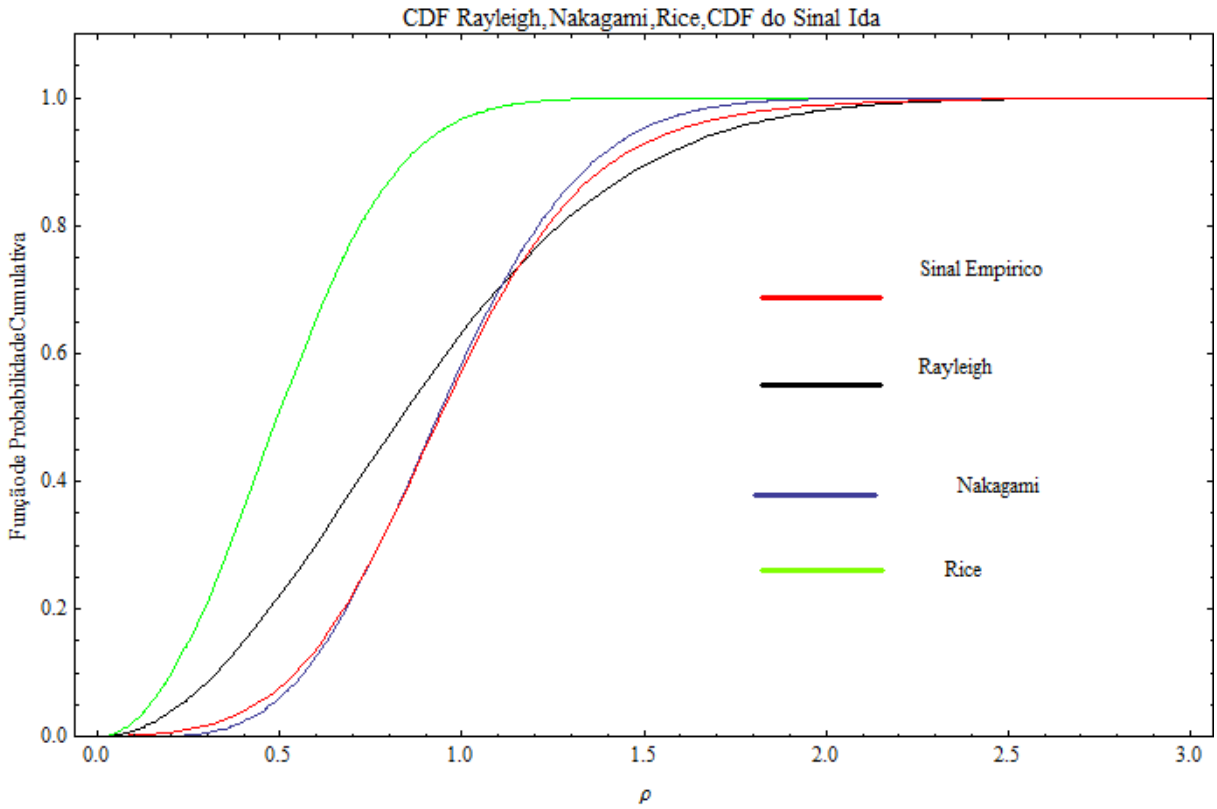

Figura 4.18 – CDFs dos sinais empírico e teóricos no Ambiente 3 quando o móvel se afasta do receptor

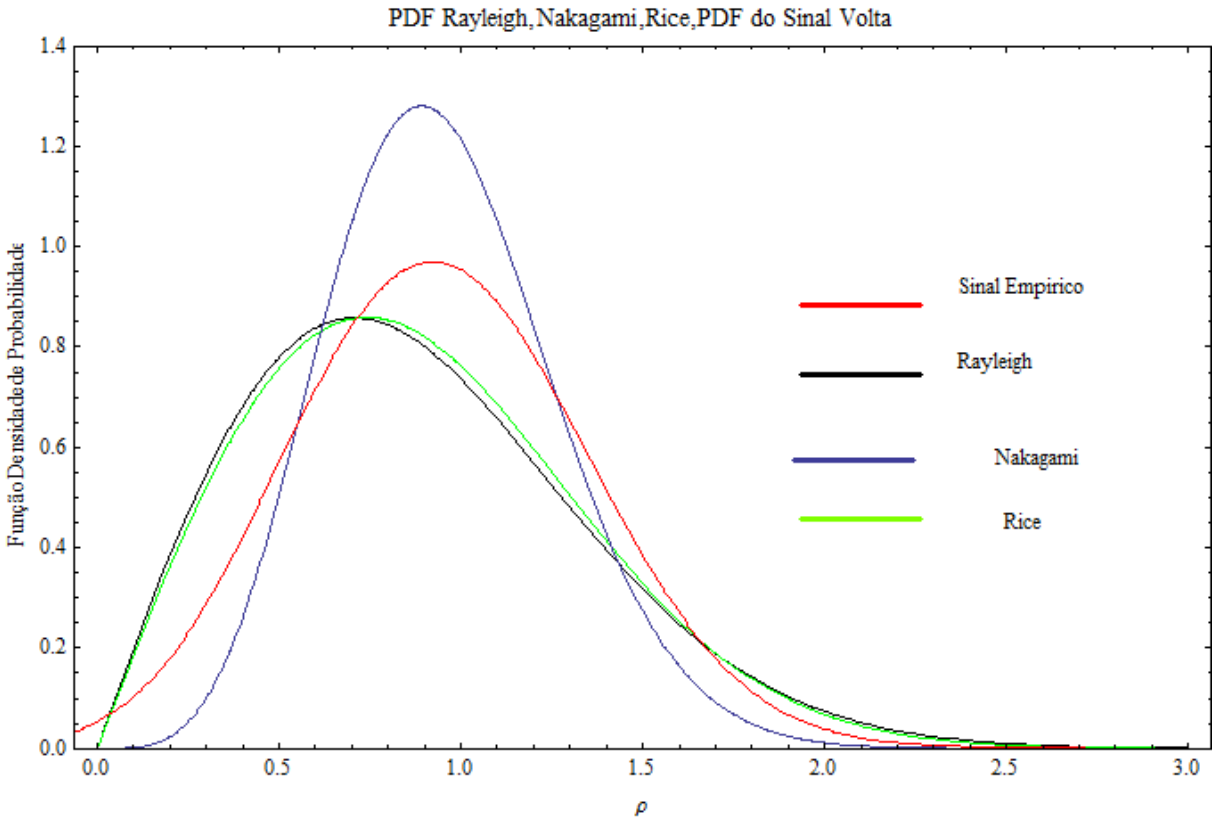

Figura 4.19 – PDFs dos sinais empírico e teóricos no Ambiente 3 quando o móvel se aproxima do receptor

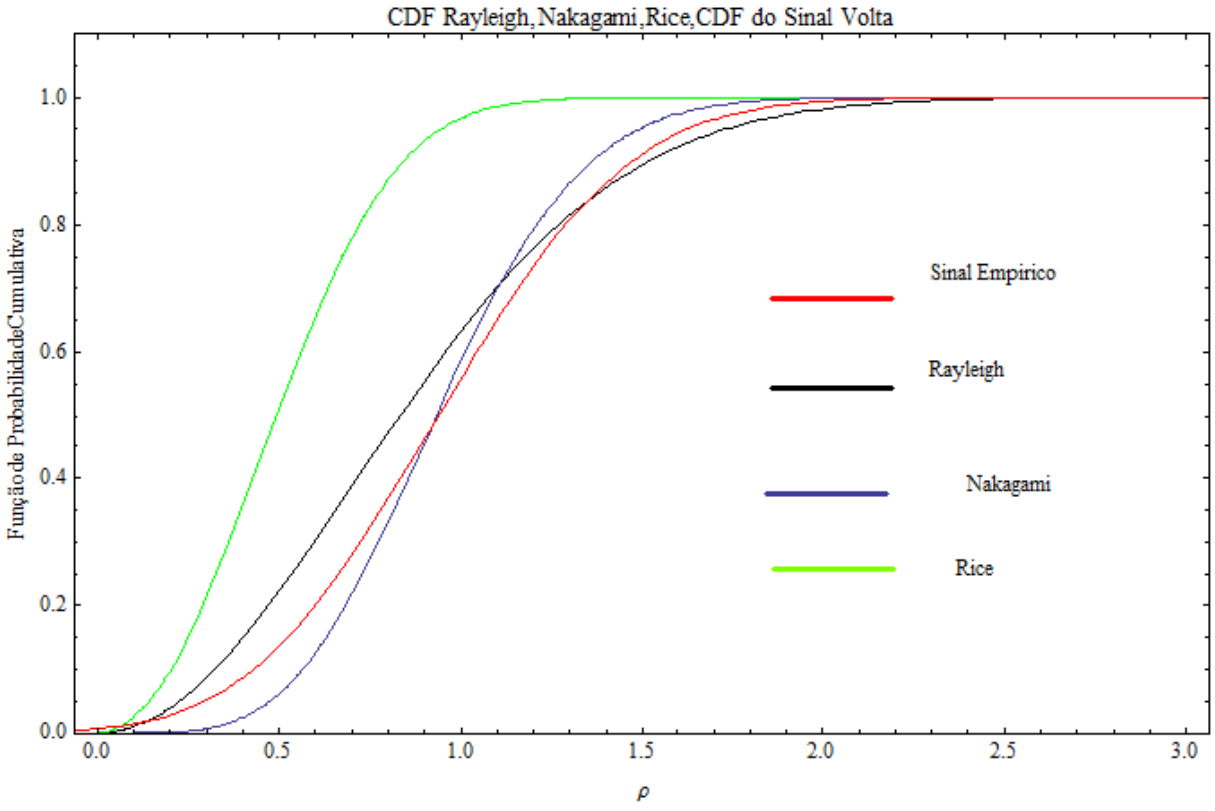

Figura 4.20 – CDFs dos sinais empírico e teóricos no Ambiente 3 quando o móvel se aproxima do receptor

4.5 DESVIOS MÉDIOS NAS ESTATÍSTICAS DE PRIMEIRA ORDEM

Como era de se esperar, os resultados empíricos sempre possuem valores que desviam dos modelos teóricos. A fim de ilustrar essas diferenças, encontram-se adiante uma tabela com as diferenças dos valores das PDFs e CDFs em cada cenário e percurso de acordo com os modelos.

Os referidos desvios médios de cada estatística de primeira ordem foram obtidos de acordo com a seguinte equação:

$$Desvio\ Médio = E|PDFprática\text{-}PDFteórica|,$$

sendo E(.) a função de esperança.

As tabelas a seguir apresentam cada um dos erros, obtidos com a equação especificada acima, de acordo com o percurso e com o cenário nos quais foram obtidas as PDFs. Os valores em destaque são das distribuições que melhor se ajustaram às curvas empíricas.

Cenário	Rayleigh	Rice	Nakagami
Ambiente 1	0,02710	0,56623	0,00252
Ambiente 2	0,00897	0,42988	0,00162
Ambiente 3	0,08011	0,53784	0,01873
Média	0,03872	0,51131	0,00762

Tabela 4.3 – Desvios médios das PDFs no percurso de afastamento

Cenário	Rayleigh	Rice	Nakagami
Ambiente 1	0,01313	0,01102	0,00066
Ambiente 2	0,00709	0,00466	0,00171
Ambiente 3	0,00976	0,00870	0,00008
Média	0,00999	0,00812	0,00081

Tabela 4.4 – Desvios médios das PDFs no percurso de aproximação

Assim como foi realizado para as PDFs, também realizamos os mesmos procedimentos para as CDFs. A equação utilizada para a obtenção dos desvios médios foi a seguinte:

$$Desvio\ Médio = E|CDFprática\text{-}CDFteórica|,$$

sendo E(.) a função de esperança.

As tabelas a seguir apresentam os erros, obtidos com a equação anterior, de acordo com o percurso e o cenário em que foram obtidas as CDFs. Os valores em destaque são relativos às distribuições que obtiveram melhor desempenho.

Cenário	Rayleigh	Rice	Nakagami
Ambiente 1	0,02392	0,14875	0,00536
Ambiente 2	0,01825	0,15916	0,00376
Ambiente 3	0,01988	0,15551	0,00456
Média	0,02068	0,15447	0,00456

Tabela 4.5 – Desvios médios das CDFs no percurso de afastamento

Cenário	Rayleigh	Rice	Nakagami
Ambiente 1	0,03691	0,22471	0,00443
Ambiente 2	0,02305	0,18921	0,00477
Ambiente 3	0,02742	0,19448	0,00155
Média	0,02912	0,2028	0,00255

Tabela 4.6 – Desvios médios das CDFs no percurso de aproximação

As figuras 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5 são relativas ao ambiente 1, a BCE. Esse cenário possui diversos objetos que podem influenciar na propagação do sinal, como estantes e pilares. Também há a presença de linha de visada em virtude do sistema transmissor ter se locomovido no sentido do corredor, tanto no afastamento quanto na aproximação, no qual o sistema receptor se encontrava no final do *hall*. Portanto, era de se esperar que os padrões de desvanecimento rápido se aproximassem melhor de um modelo que abrange tanto a componente de LOS quanto as componentes devido aos multipercursos.

Tendo como base as tabelas referentes aos desvios médios, vemos que o modelo de Nakagami foi o que melhor se aproximou. A distribuição de Rice, teoricamente, também poderia descrever bem o sinal medido, mas seu desvio foi maior do que o observado em Nakagami. Provavalmente, Rice não se ajustou bem a situação devido à parte dominante do sinal não ser originada da LOS, mas das reflexões e refrações nos objetos do cenário.

Tanto no sentido de afastamento quanto de aproximação entre o transmissor e receptor, a distribuição de Nakagami obteve o melhor desempenho. Como o caminho percorrido pelo móvel e a posição dos obstáculos se mantiveram os mesmos, era de se esperar que uma distribuição se ajustasse para as duas situações.

As figuras 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9 correspondem às PDFs e CDFs relativas ao sinal capturado no ambiente 2, no caso o corredor do departamento da CIC. Se trata de um corredor cercado por paredes localizado no subterrâneo, com alguns móveis no seu interior, como estantes, mesas e cadeiras. Conforme previsto no ambiente anterior, também era de se esperar que um modelo que envolvesse tanto as componentes de visada quanto as de multipercursos predominasse nesse cenário.

Observando as tabelas referente aos desvios em relação aos modelos teóricos, novamente o modelo de Nakagami foi o que melhor descreveu o comportamento do sinal. Nesse caso, o desvio médio foi ainda menor do que o observado nas medições na BCE. Isso pode ser explicado pelo fato desse ambiente não possuir tantos móveis e do tráfego de pessoas ter sido bem menor. Tanto no trajeto de ida quanto de volta, as duas situações se assemelharam ao modelo de Nakagami, pois ele se ajusta bem em locais com presença de LOS e multipercursos.

Por fim, as figuras 4.10, 4.11, 4.12 e 4.13 são oriundas dos dados obtidos na campanha de medição do ambiente 3, que foi a estação da 114 Sul do Metrô-DF. Nesse caso, o local é uma plataforma de embarque e desembarque de passageiros localizada no subterrâneo,

caracterizando um local com forte presença de multipercursos, quando há a presença de muitas pessoas, ou de uma componente de LOS um pouco mais forte, quando a estação está mais desocupada.

Tomando como referência as tabelas de desvios, as curvas de desvanecimento rápido ficaram mais próximas do modelo de Nakagami, pois os erros obtidos para essa distribuição foram menores. Por se tratar de um local cujo sinal sofra com grandes taxas de reflexões, seja nas locomotivas ou nas pessoas circulando no terminal, era de se esperar que essa distribuição modelasse o comportamento do sinal com maior precisão, seja ao se aproximar ou ao se afastar da antena transmissora.

Observando todos os gráficos e os dados da tabela de desvios, foi constatado que a distribuição de Nagakami obteve um desempenho superior às distribuições de Rayleigh e Rice. O modelo de Rayleigh normalmente descreve bem ambientes cujo sinal sofra apenas com os fenômenos de multipercurso, em detrimento da existência de uma LOS [15]. Já o modelo de Rice descreve um pouco melhor esses ambientes com características híbridas, pois sua componente de amplitude dominante tende a ser o sinal da visada.

Por fim, a distribuição de Nakagami se aplica bem a todos esses modelos descritos anteriormente. Devido ao seu fator de desvanecimento (m), que é o que mais influencia na sua distribuição, esse modelo possibilita uma grande variedade de condições de desvanecimento, fornecendo uma boa aproximação com os dados reais. Ela pode, por exemplo, ser reduzida ao modelo de Rayleigh (m=1) ou modelar condições mais ou menos severas que esse modelo (m diferente de 1) [18].

4.6 ESTATÍSTICAS DE SEGUNDA ORDEM

Nesta seção, encontram-se os gráficos das funções de autocorrelação, obtidos a partir dos gráficos dos sinais empíricos.

Os resultados obtidos com os sinais de campo também foram comparados com os valores esperados dos modelos teóricos, a fim de observarmos o modelo que melhor se ajusta aos cenários em questão. Para realizar tal procedimento, novamente foi elaborada uma tabela com os valores dos desvios médios entre esses valores, possibilitando uma análise rápida e direta.

A seguir, está a formulação utilizada no cálculo da função de autocorrelação, baseada nos artigos [14] e [16]. A equação é a mesma para os três modelos estatísticos, variando apenas os parâmetros.

A função de autocorrelação é expressa por:

$$= \text{Hypergeometric2F1}\left[-\frac{1}{\alpha}, -\frac{1}{\alpha}, \mu, \text{Abs}\left[1/\text{BesselI}[0,q]\left(\zeta\,\text{BesselI}\left[0, \sqrt{q^2-(2\pi w)^2 + j4\pi q\,\text{Cos}[\phi]w}\right]\right.\right.\right.$$
$$\left.\left.\left. + (1-\zeta)\,\text{BesselJ}[0, 2*\pi*w]\,\text{BesselI}[0,q]\right)\right]^2\right] / \text{Hypergeometric2F1}[-\frac{1}{\alpha}, -\frac{1}{\alpha}, \mu, 1]$$

Para a distribuição de Rayleigh:

$$\alpha = 1.9; \mu = 1.$$

Para o modelo de Rice:

$$\alpha = 1.9; \mu = k;$$

$$m = \frac{1}{Variance[\rho i * \rho i]}$$

$$k = \frac{1}{m}$$

Já para o modelo de Nakagami:

$$\alpha = 1.9; \mu = m$$

As figuras a seguir mostram as funções de autocorrelação dos sinais em cada um dos ambientes, no percurso de aproximação ou de afastamento do sistema receptor. Também encontram-se nas mesmas figuras as ACFs dos modelos teóricos, permitindo uma melhor visualização de seus comportamentos.

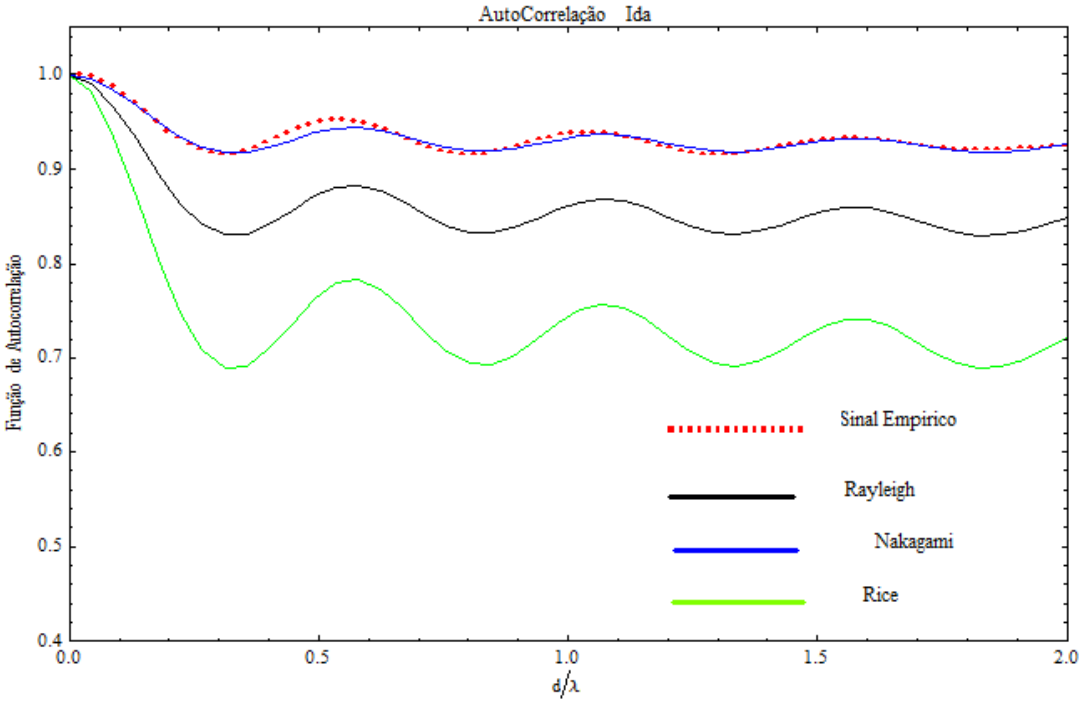

Figura 4.21 – ACFs dos sinais empírico e teóricos no Ambiente 1 quando o móvel se afasta do receptor

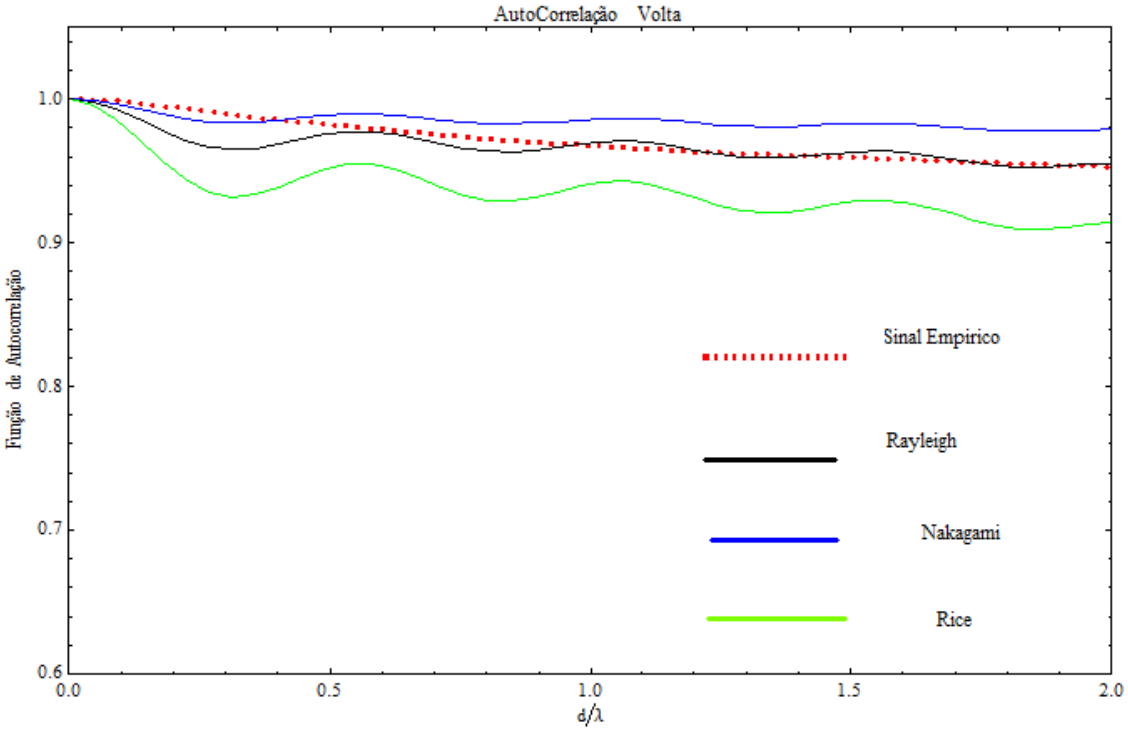

Figura 4.22 – ACFs dos sinais empírico e teóricos no Ambiente 1 quando o móvel se aproxima do receptor

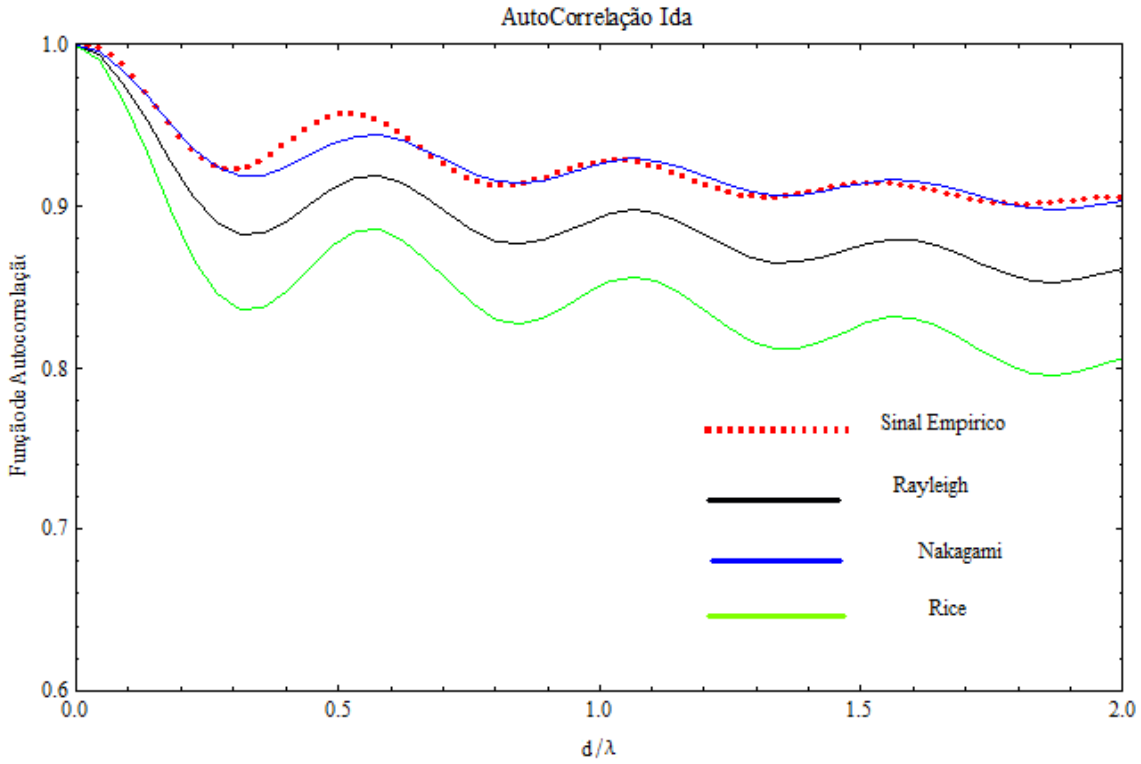

Figura 4.23 – ACFs dos sinais empírico e teóricos no Ambiente 2 quando o móvel se afasta do receptor

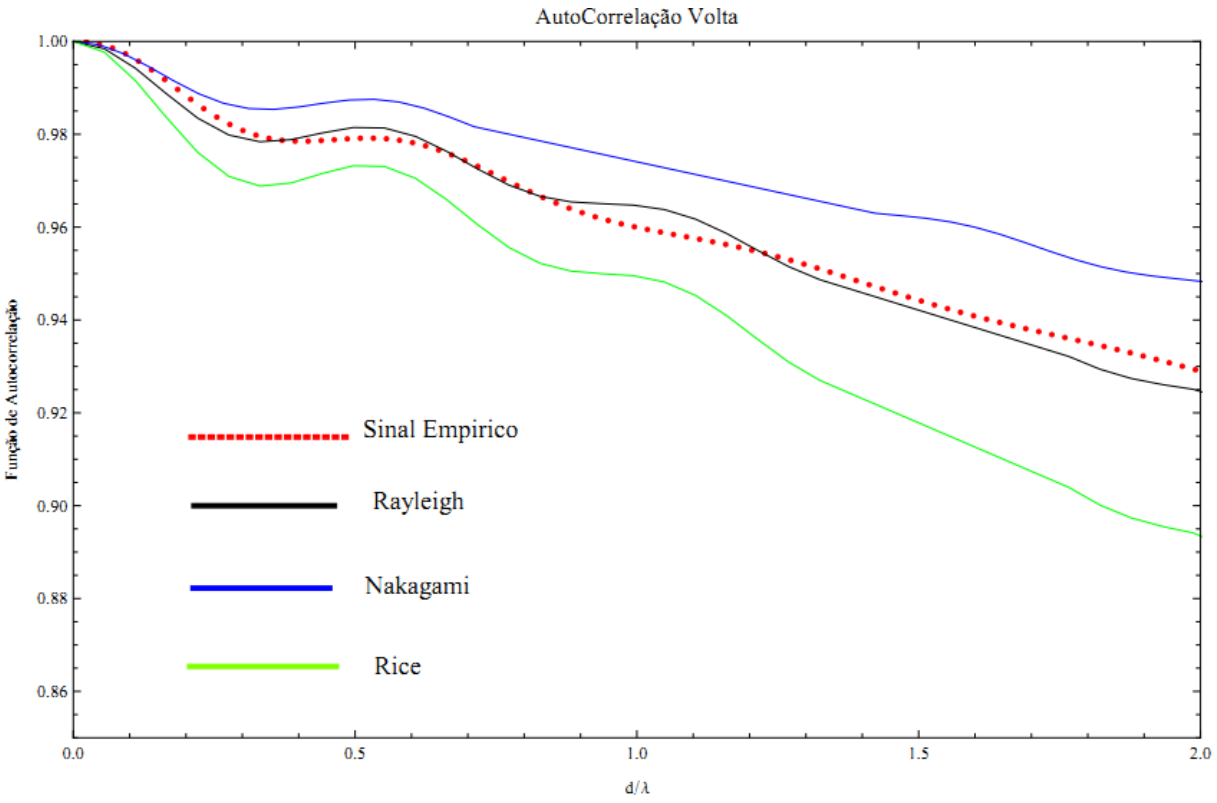

Figura 4.24 – ACFs dos sinais empírico e teóricos no Ambiente 2 quando o móvel se aproxima do receptor

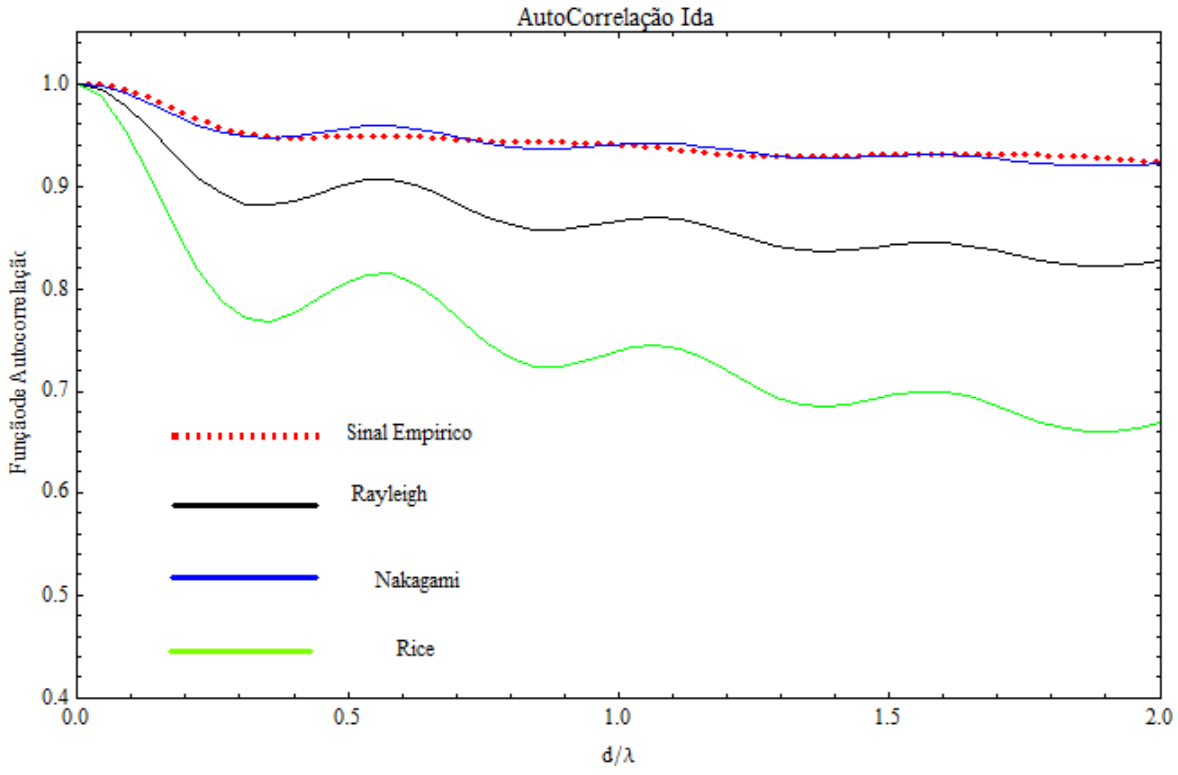

Figura 4.25 – ACFs dos sinais empírico e teóricos no Ambiente 3 quando o móvel se afasta do receptor

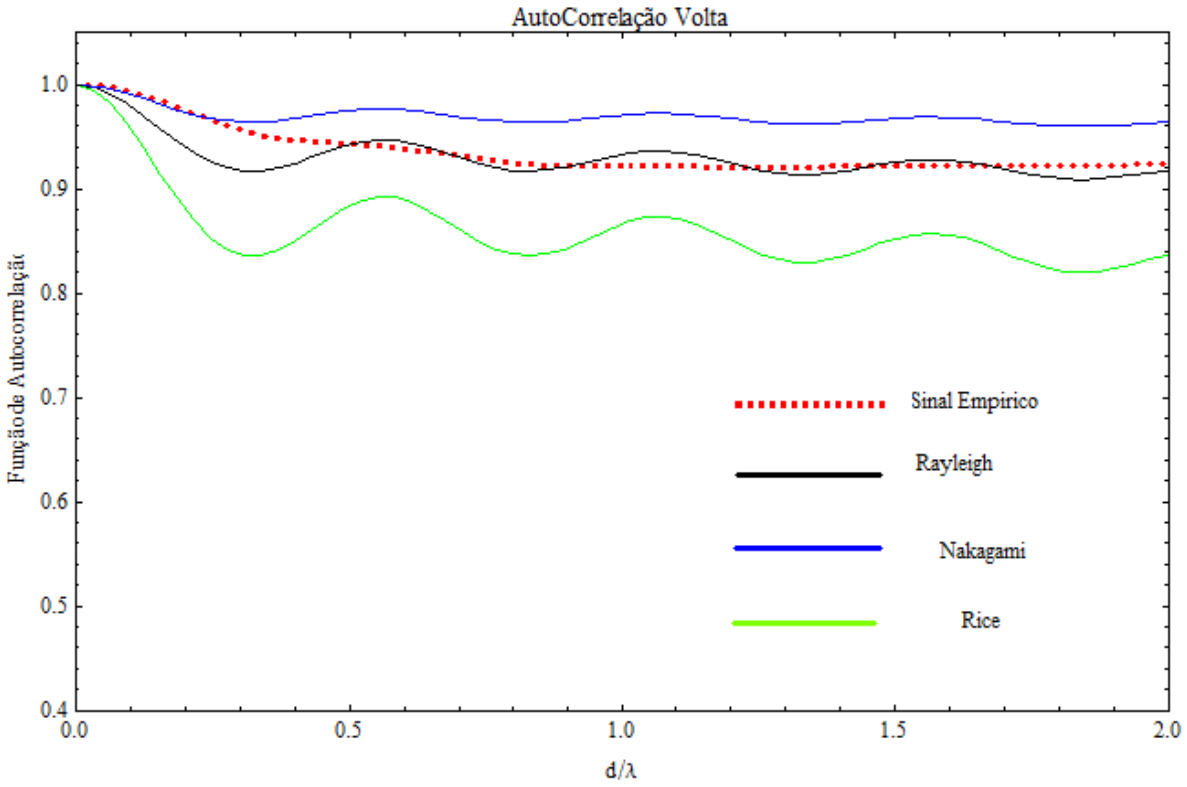

Figura 4.26 – ACFs dos sinais empírico e teóricos no Ambiente 3 quando o móvel se aproxima do receptor

4.7 DESVIOS MÉDIOS NAS ESTATÍSTICAS DE SEGUNDA ORDEM

Assim como na elaboração das PDFs e CDFs, aqui também foram observados desvios em relação aos dados teóricos. Para obtenção dessas diferenças, foi utilizada a seguinte fórmula:

$$Desvio\ Médio = E|ACFprática\text{-}ACFteórica|,$$

sendo E(.) a função esperança.

Na tabela abaixo estão postados os erros as ACFs empíricas de cada cenário em relação as distribuições teóricas. Estão em destaque as distribuições que melhor se aproximação dos valores práticos.

Cenário	Rayleigh	Rice	Nakagami
Ambiente 1	0,12835	0,16965	0,03038
Ambiente 2	0,12685	0,16432	0,06939
Ambiente 3	0,14541	0,13942	0,02962
Média	0,13353	0,15779	0,04313

Tabela 4.7 – Desvios médios das ACFs no percurso de afastamento

Cenário	Rayleigh	Rice	Nakagami
Ambiente 1	0,07155	0,28364	0,32513
Ambiente 2	0,10680	0,20022	0,23780
Ambiente 3	0,02666	0,33603	0,32527
Média	0,06833	0,27329	0,29606

Tabela 4.8 – Desvios médios das ACFs no percurso de aproximação

As figuras 4.14 e 4.15 fazem referência às ACFs obtidas no ambiente 1. Conforme descrito anteriormente, esse cenário possibilita a obtenção de um sinal via LOS e multipercursos. Portanto era de se esperar que o modelo de Nakagami modelasse bem a variação do nível do sinal em curtos intervalos de tempo. Contudo, para o percurso de aproximação, o modelo de Rayleigh foi o que obteve o menor desvio. Na teoria, não era esperado que Rayleigh descrevesse bem essa variação, pois, no percurso de aproximação, a LOS é mais evidente do que no percurso de distanciamento, devido à presença do corpo humano entre o terminal móvel e o sistema receptor. Podemos observar, no gráfico que descreve a ACF no percurso de aproximação, um decaimento do seu nível médio, bem como sua pequena variação em função do tempo, o que caracteriza a presença de LOS.

As figuras 4.16 e 4.17 ilustram as ACFs relativas ao ambiente 2. Esse cenário faz com que o sinal sofra multipercursos, devido às paredes e móveis, além de permitir LOS. Naturalmente, modelos que descrevem bem essas características deveriam se aplicar a tal ambiente. No percurso de afastamento dos terminais, o modelo de Nakagami melhor descreveu a variação do sinal em curtos períodos de tempo. Contudo, na situação em que os terminais ficam mais próximos, o modelo de Rayleigh foi o que obteve melhor desempenho.

As figuras 4.18 e 4.19 foram obtidas com os dados coletados no ambiente 3. Esse cenário possui grande influência de multipercursos devido ao fluxo de pessoas e de trens, bem como LOS. O modelo de Nakagami obteve os menores erros quando o transmissor se distanciou do receptor. Entretanto, foi o modelo de Rayleigh que melhor se aproximou a ACF na ocasião em que o transmissor de aproximou do receptor.

4.8 CONCLUSÕES

Nesse capítulo foram expostos os níveis do sinal da rede celular, que serviu como motivação para a instalação da femtocélula. Depois, analisamos as estatísticas de primeira e segunda ordem dos sinais em cada cenário. Vimos com quais distribuições teóricas para as funções de densidade de probabilidade e de distribuição cumulativa, bem como as funções de autocorrelação, os sinais se aproximam com a obtenção do desvio médio desses resultados.

Capítulo 5

Considerações finais

A proposta implementação de uma rede de femtocélula é de suma importância, visto a crescente demanda de utilização de terminais comunicantes móveis em ambientes fechados. Conforme visto nesse trabalho, esse não é um processo muito simples, porque diversos detalhes devem ser levados em conta até a inicialização do sinal da rede interna.

5.1 CONCLUSÃO GERAL

O processo de instalação de uma femtocélula foi iniciado com o estudo de características cruciais para seu funcionamento, que se iniciou com a busca de locais viáveis para seu funcionamento, passando pela busca bibliográfica de dados como faixas de frequência e potência de irradiação.

Após esta etapa, fomos aos locais escolhidos para obtermos dados referentes a portadora, que foi gerada e capturada por nossos sistemas experimentais, e elaboramos suas estatísticas a fim de modelarmos o comportamento de acordo com as distribuições teóricas mais consagradas na literatura.

Podemos concluir que a instalação desse sistema é viável e de suma importância, pois estende o serviço prestado pela rede celular convencional a locais de acesso mais difícil, dispensando a utilização dos antigos sistemas fixos.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

Com a realização desse trabalho, uma pequena parte do processo de instalação de uma femtocélula foi solucionada. Contudo, existem inúmeros outros entraves que precisam ser melhor estudados para uma adequada instalação de um sistema desse tipo. Entre as principais questões que podem ser trabalhadas estão:

- Alocação de faixas desocupadas do espectro, a fim de evitar desperdício de faixas de frequência não-utilizadas que se localizam entre as faixas usuais;

- Escolha sucinta das faixas de frequência a serem utilizadas, para evitar possíveis interferências com faixas já utilizadas pela rede celular;

- *Handoff* ativo, de livre iniciativa do usuário, que permita a integração entre as redes de Femtocélulas, celular e até mesmo WLANs;

- *Handoff* passivo, de iniciativa da rede celular e da Femtocélula, com finalidade de distribuir o tráfego das redes, assim otimizando o serviço prestado;

- Utilização de sistemas isotrópicos ou diretivos, de acordo com o tipo de cenário (predominância de LOS, multipercursos ou híbrido);

- Investigar outras estatísticas de primeira ordem, para observar se outros modelos se ajustam a essas aplicações.

Referências Bibliográficas

[1] Jie Zhang, Guillaume de la Roche. Femtocells: Technologies and Deployment. 2010.

[2] Joseph Boccuzzi, Michael Ruggiero. Femtocells: Design & Application. 2011.

[3] J. Cullen, 'Radioframe presentation,' in Femtocell Europe 2008 , London, UK, June 2008.

[4] D. Choi, P. Monajemi, S. Kang, and J. Villasenor, 'Dealing with Loud Neighbors: The Benefits and Tradeoffs of Adaptive Femtocell Access,' in 'IEEE Global Telecommunications Conference (Globecom)', Dec. 2008, pp. 1–5.

[5] 3GPP, '3G Home NodeB Study Item Technical Report,' 3rd Generation Partnership Project – Technical Specification Group Radio Access Networks, Valbonne (France), Tech. Rep. 8.2.0, Sep. 2008.

[6] R. S. Karlsson, 'Radio resource sharing and capacity of some multiple access methods in hierarchical cell structures,' in Vehicular Technology Conference (VTC), vol. 5, Sep. 1999, pp. 2825–2829.

[7] M. Beach, et al., 'A Study into the Application of Interference Cancellation Techniques,' Ofcom, Tech. Rep., Apr. 2006, Report No: 72/06/R/038/U.

[8] J. G. Proakis, 'Interference suppression in spread spectrum systems,' in International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications, vol. 1, Sep. 1996, pp. 259–266.

[9] J. Schodorf and D. Williams, 'A constrained optimization approach to multiuser detection,' IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 45, no. 1, pp. 258–262, Jan. 1997.

[10] Socrates, 'Use cases for self-organising networks,' SOCRATES Project, 2008.

[11] 3GPP TR 25.820, '3G Home NodeB Study Item Technical Report,' 3GPP-TSG RAN, Valbonne, France, 8.2.0, Sep. 2008.

[12] 3GPP RAN, 'Reply LS on access control for CSG cells,' 3GPP-TSG RAN, Prague, Czech Republic, Tech. Rep. R2-086035, Oct. 2008.

[13] 3GPP Technical Specification (TS) 25.104, Base Station (BS) radio transmission and reception (FDD), Version 9.4.0, 2010.

[14] U.S.Dias. Distribuição de Fase e Estatísticas Correlacionadas em Ambientes Sem Fio: Teoria e Validação Experimental. Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas. Março, 2010.

[15] Jean Felipe Fonseca de Oliveira. Avaliação Experimental do Desempenho do Canal Móvel do Sistema Brasileiro de Televisão Digital. Tese de Mestrado - Universidade Federal de Campina Grande. Dezembro, 2008.

[16] U.S.Dias, M.D.Yacoub. On the α-μ Autocorrelation and Power Spectrum Functions: Field Trials and Validation. In: IEEE Global Communications Conference. 2009.

[17] Diogo Lisita Pinto, Pablo Estrela Alves. Modelagem empírica e estatística do canal rádio-móvel em 2,5 GHz. Trabalho de Graduação – Universidade de Brasília. Março, 2012.

[18] Evandro Rodrigues Silva. Análise estatística dos padrões de redes sem fio 802.11 a/b/g. Trabalho de Graduação – Universidade da Amazônia. 2006.