



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

Wanessa de Alvarenga Silva

**SENSORIAMENTO DE ESPECTRO EM
SISTEMA DE RÁDIO COGNITIVO
COM DESVANECIMENTO COMPOSTO**

Brasília, agosto de 2015



Wanessa de Alvarenga Silva

**SENSORIAMENTO DE ESPECTRO EM
SISTEMA DE RÁDIO COGNITIVO
COM DESVANECIMENTO COMPOSTO**

Dissertação de Mestrado submetida ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Ugo Silva Dias.

BRASÍLIA

2015

FICHA CATALOGRÁFICA

SILVA, WANESSA DE ALVARENGA

Sensoriamento de Espectro em Sistema de Rádio Cognitivo com Desvanecimento Composto. [Distrito Federal] 2015.

109 p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Mestre, Engenharia Elétrica, 2015).

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Modelo de Desvanecimento Composto

2. Rádio Cognitivo

3. Sensoriamento de Espectro

4. Investigação Experimental

I. ENE/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Silva, W. A. (2015). Sensoriamento de Espectro em Sistema de Rádio Cognitivo com Desvanecimento Composto. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGEE.DM-601/15, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 109 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Wanessa de Alvarenga Silva.

TÍTULO: Sensoriamento de Espectro em Sistema de Rádio Cognitivo com Desvanecimento Composto.

GRAU: Mestre

ANO: 2015

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

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

SENSORIAMENTO DE ESPECTRO EM SISTEMAS RÁDIO
COGNITIVO COM DESVANECIMENTO COMPOSTO

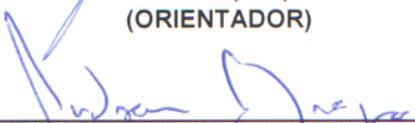
WANESSA DE ALVARENGA SILVA

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

APROVADA POR:



UGO SILVA DIAS, Dr., ENE/UNB
(ORIENTADOR)



ADONIRAN JUDSON BRAGA, Dr., ENE/UNB
(EXAMINADOR INTERNO)



FRANCISCO CARLOS BENTES FREY MÜLLER, Dr., UFPA
(EXAMINADOR EXTERNO)

Brasília, 10 de agosto de 2015.

Agradecimentos

Agradeço a Deus, por tudo.

À minha família.

Ao meu orientador Ugo Silva Dias, por ter me guiado desde a graduação, pelos ensinamentos dentro e fora da sala de aula, por toda atenção e dedicação.

À CAPES pelo apoio financeiro.

A todos aqueles que de alguma forma colaboraram para a conclusão desta dissertação.

Wanessa de Alvarenga Silva

RESUMO

O desejo pela evolução dos sistemas de telecomunicações e as questões relativas à escassez espectral impulsionam o desenvolvimento de tecnologias de comunicação sem fio mais eficientes e mais inteligentes. Pautado neste paradigma tecnológico, este trabalho apresenta e investiga a análise de sistemas de rádios cognitivos com ênfase em sensoriamento espectral baseado em detecção de energia, operando em canais modelados pelas distribuições compostas Nakagami- m /Gamma e κ - μ sombreada. Investigam-se as probabilidades de detecção, de alarme falso e de perda de detecção em cenários de sensoriamento simples e cooperativo. Medidas de campo são utilizadas para investigar a utilidade prática dos modelos compostos Nakagami- m /Gamma e κ - μ sombreado, ilustrando o excelente ajuste destas distribuições a dados obtidos em ambientes reais. Comparando os modelos de desvanecimento tradicionais com os modelos compostos, observa-se a vantagem em se modelar canais com distribuições compostas, uma vez que estas caracterizam os canais de modo mais realístico. A fim de ampliar a análise de modelos de desvanecimento compostos, esta dissertação propõe e realiza uma investigação prática da função de densidade de probabilidade (PDF) e da função de densidade acumulativa (CDF) da distribuição composta α - μ / α - μ que é um resultado recente na literatura. A distribuição composta α - μ / α - μ , que descreve mutuamente os efeitos dos desvanecimentos de pequena e de larga escala, pode ser considerada uma importante ferramenta matemática para modelar uma ampla variedade de canais de comunicação. A presente investigação inclui comparações entre PDFs e CDFs teóricas e práticas. A análise foi realizada para sistemas de comunicação operando em 700 MHz, 1800 MHz e 2500 MHz, em ambientes urbanos típicos. Os resultados comprovam a utilidade, a eficiência e a flexibilidade do modelo α - μ / α - μ e a investigação abordada proporciona uma base informativa para uma posterior análise em sistemas de rádios cognitivos.

Palavras-chave: Modelos de desvanecimento compostos, Nakagami- m /Gamma, κ - μ Sombreado, Distribuição α - μ / α - μ , Sensoriamento espectral.

ABSTRACT

The desire for the telecommunications systems evolution and the issues relating to spectral shortages drive the development of more efficient and smarter wireless communication technologies. Guided in this technological paradigm, this paper presents and investigates the analysis of cognitive radio systems with emphasis in spectrum sensing based on energy detection, under Nakagami- m /Gamma and κ - μ shadowed channels. The detection probability, false alarm probability and the missing probability in single and cooperative sensing scenarios are investigated. Field measurements are used to investigate the practical use of the Nakagami- m /Gamma and κ - μ shadowed composite models. It can be observed that excellent fit of these distributions to data in real environments. There is the advantage in shaping channels with composite distributions, comparing the traditional fading models against composite fading models, since these characterize the channels more realistically. In order to expand the analysis of composite fading models, this paper proposes and carries out the practical research of the α - μ / α - μ probability density function (PDF) and cumulative density function (CDF) which are a recent result in the literature. The composite distribution α - μ / α - μ , describes the effects of fast and slow fading, it can be considered as an important mathematical tool for modeling a wide variety of communication channels. This research includes comparisons between theoretical and practical PDFs and CDFs. The analysis was performed for radio channels operating at 700 MHz, 1800 MHz and 2500 MHz in typical urban environments. The results show the usefulness, efficiency and flexibility of the α - μ / α - μ model and the presented investigation provides information for posterior analysis based on cognitive radio systems.

Keywords: Composite fading models, Nakagami- m /Gamma, κ - μ Shadowed, α - μ / α - μ fading channel, Spectrum sensing.

LISTA DE SIGLAS

4G	Quarta Geração
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
AWGN	<i>Additive white Gaussian noise</i>
CDF	<i>Cumulative Density Function</i>
CRN	<i>Cognitive Radio Network</i>
DCS	<i>Digital Celular System</i>
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i>
FCC	<i>Federal Communications Commission</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>
HF	<i>High Frequency</i>
LNA	<i>Low Noise Amplifier</i>
LOS	<i>Line-of-sight</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
NLOS	<i>Non-line-of-sight</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
PDF	<i>Probability Density Function</i>
PSD	<i>Power Spectral Density</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RBW	<i>Resolution Bandwidth</i>
ROC	<i>Receiver Operation Characteristic</i>
RSR	Relação sinal-ruído
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>
UnB	Universidade de Brasília
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas
UP	Usuário primário

US	Usuário secundário
VHF	<i>Very High Frequency</i>
VBW	<i>Video Bandwidth</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

$E[\cdot]$	Esperança	
$f_X(x)$	Função densidade de probabilidade da variável x	
$F_X(x)$	Função de distribuição cumulativa da variável x	
${}_1F_1[\cdot; \cdot; \cdot]$	Função hipergeométrica	
h	Ganho do canal de comunicação	
k	Variável iterativa	
H_0	Hipótese de canal ocioso	
H_1	Hipótese de canal ocupado	
$I_\nu[\cdot]$	Função Bessel modificada de primeiro tipo e ordem ν	
$K_\nu[\cdot]$	Função Bessel modificada de segundo tipo e ordem ν	
m	Parâmetro de Nakagami relacionado aos <i>clusters</i> de multipercursos	
m_s	Parâmetro de sombreamento	
$n(t)$	Ruído Gaussiano Branco no canal	
$P\{\cdot\}$	Probabilidade	
P_d	Probabilidade de detecção	
P_f	Probabilidade de alarme falso	
P_m	Probabilidade de perda de detecção	
Q_d	Probabilidade de detecção cooperativa	
Q_f	Probabilidade de alarme falso cooperativa	
Q_m	Probabilidade de perda de detecção cooperativa	
$Q_u[\cdot, \cdot]$	Função Marcum-Q generalizada	
r	Envoltória instantânea do sinal	[V]
\hat{r}	Envoltória média do sinal	[V]
R	Variável aleatória	
T_C	Tempo de coerência do canal	
T_S	Tempo de duração de símbolo	
$V[\cdot]$	Variância	
$x(t)$	Sinal transmitido pelo usuário primário	

$y(t)$	Sinal recebido pelo usuário secundário	
α	Parâmetro de não-linearidade	
β	Margem de incerteza na estimação do ruído	[dB]
κ	Razão entre potência total das componentes dominantes e a potência total das componentes espalhadas	
η	Razão entre as componentes em fase e em quadratura de cada <i>cluster</i> de multipercurso	
δ	Probabilidade de perda de detecção	
δ_s^2	Potência estimada do ruído	
σ	Desvio padrão	
μ	Parâmetro relacionado aos <i>clusters</i> de multipercursos	
λ	Limiar de decisão	
γ	Relação sinal-ruído instantânea	
$\bar{\gamma}$	Relação sinal-ruído média	
$\Gamma[\cdot]$	Função Gamma	
$\Gamma[\cdot, \cdot]$	Função Gamma incompleta	
ϵ	Probabilidade de alarme falso	
ρ	Envoltória do sinal normalizada	
Ω	Potência média da envoltória do sinal	
Ω_s	Potência média de sombreamento	

LISTA DE FIGURAS

1.1	Atribuição de frequências na faixas VHF no Brasil.....	2
1.2	Atribuição de frequências na faixas UHF no Brasil.....	3
2.1	Função de Densidade de Probabilidade Nakagami- m com $\bar{\gamma} = 1.00$ dB.	12
2.2	Função de Densidade de Probabilidade Nakagami- m com $\bar{\gamma} = 3.00$ dB.	12
2.3	Função de Densidade de Probabilidade α - μ com $\alpha = 1.50$ e $\bar{\gamma} = 3.00$ dB.	14
2.4	Função de Densidade de Probabilidade α - μ com $\mu = 1.50$ e $\bar{\gamma} = 3.00$ dB.	14
2.5	Função de Densidade de Probabilidade κ - μ com $\kappa = 0.50$ e $\bar{\gamma} = 3.00$ dB.....	16
2.6	Função de Densidade de Probabilidade κ - μ com $\mu = 1.50$ e $\bar{\gamma} = 3.00$ dB.....	16
2.7	Sinal de rádio recebido sob os efeitos do desvanecimento.	17
2.8	Função de Densidade de Probabilidade Log-normal com $\bar{\gamma} = 1.00$ dB.....	18
2.9	Função de Densidade de Probabilidade Gamma com $\Omega_s = 1.00$ dB.....	19
2.10	Função de Densidade de Probabilidade Nakagami- m /Gamma com $m_s = 2.50$ e $\bar{\gamma} = 3.00$ dB.	22
2.11	Função de Densidade de Probabilidade Nakagami- m /Gamma com $m = 2.00$ e $\bar{\gamma} = 3.00$ dB.....	22
2.12	Função Densidade de Probabilidade κ - μ sombreada com $\mu = 1.20$, $m_s = 2.50$ e $\bar{\gamma} = 3.00$	24
2.13	Função de Densidade de Probabilidade κ - μ sombreada com $\kappa = 1.20$, $m_s =$ 2.50 e $\bar{\gamma} = 3.00$	25
2.14	Função de Densidade de Probabilidade κ - μ sombreada com $\kappa = 1.80$, $\mu = 1.80$ e $\bar{\gamma} = 3.00$	25
2.15	Função de Densidade de Probabilidade α - μ/α - μ com $\alpha_y = 3.50$, $\mu_y = 3.00$ e $\bar{y} = 1.00$	28
2.16	Função de Densidade de Probabilidade α - μ/α - μ com $\alpha_x = 2.50$, $\mu_x = 2.00$ e $\bar{x} = 1.00$	28
3.1	Ciclo básico de um sistema de rádio cognitivo.....	32
3.2	Arquitetura de uma rede de rádio cognitivo.....	34

3.3	Característica de operação do receptor típica de um canal com desvanecimento Nakagami- m .	37
3.4	Diagrama de blocos de um detector de energia.	39
3.5	Fluxograma de um detector de energia.	39
3.6	Diagrama de blocos da análise cicloestacionária.	40
3.7	Fluxograma da análise cicloestacionária.	41
3.8	Diagrama de blocos de um filtro casado.	42
3.9	Fluxograma de um filtro casado.	42
4.1	Característica de operação do receptor em canais com desvanecimento composto Nakagami- m /Gamma ($m_s = 3, u = 5$ e $\bar{\gamma} = 10$ dB).	48
4.2	Característica de operação do receptor em canais com desvanecimento composto Nakagami- m /Gamma ($m = 0.60, u = 5$ e $\bar{\gamma} = 10$ dB).	48
4.3	Característica de operação do receptor em canais com desvanecimento composto κ - μ sombreada ($m_s = 3, u = 5$ e $\bar{\gamma} = 10$ dB).	50
4.4	Característica de operação do receptor em canais com desvanecimento composto κ - μ sombreada ($\kappa = 1.5, \mu = 1, u = 5$ e $\bar{\gamma} = 10$ dB).	50
4.5	Característica de operação do receptor em canais com desvanecimento Nakagami- m /Gamma com esquema cooperativo ($m = 2, u = 5, \bar{\gamma} = 10$ dB e $\beta = 0$ dB).	53
4.6	Probabilidade de detecção em canais Nakagami- m /Gamma com esquema cooperativo sob sombreamento severo ($m = 2, m_s = 0.5, Q_f = 10^{-1}$ e $u = 5$).	54
4.7	Probabilidade de detecção em canais Nakagami- m /Gamma com esquema cooperativo sob sombreamento suave ($m = 2, m_s = 5.0, Q_f = 10^{-1}$ e $u = 5$).	54
4.8	Característica de operação do receptor em canais com desvanecimento κ - μ sombreado com esquema cooperativo ($\kappa = 1.5, \mu = 1, u = 5, \bar{\gamma} = 10$ dB e $\beta = 0$ dB).	56
4.9	Probabilidade de detecção em canais κ - μ sombreado com esquema cooperativo sob sombreamento severo ($\kappa = 1.5, \mu = 1, m_s = 0.5, Q_f = 10^{-1}$ e $u = 5$).	57
4.10	Probabilidade de detecção em canais κ - μ sombreado com esquema cooperativo sob sombreamento suave ($\kappa = 1.5, \mu = 1, m_s = 5, Q_f = 10^{-1}$ e $u = 5$).	57
4.11	Comparação da probabilidade de detecção para os modelos compostos Nakagami- m /Gamma e Rayleigh/Gamma com dados experimentais do DCS 1800 ($m_s = 0.50, n = 18$ e $u = 2$).	59

4.12	Comparação da probabilidade de detecção para os modelos compostos κ - μ sombreado e Rice sombreado com dados experimentais do DCS 1800 ($m_s = 0.50$, $n = 18$ e $u = 2$).....	60
5.1	Diagrama do sistema de medição.....	65
5.2	Sistema de transmissão – UNICAMP.....	66
5.3	Sistema de transmissão – UnB.	67
5.4	Sistema de recepção móvel – UnB.	68
5.5	Sistema de recepção móvel – UNICAMP.....	69
5.6	Comparação das PDFs teóricas e empíricas em 1800 MHz.....	72
5.7	Comparação das PDFs teóricas e empíricas em 700 MHz, 1800 MHz e 2500 MHz.....	72
5.8	Comparação das CDFs teóricas e empíricas em 1800 MHz.....	73
5.9	Comparação das CDFs teóricas e empíricas em 700 MHz, 1800 MHz e 2500 MHz.....	74

LISTA DE TABELAS

2.1	Casos especiais da distribuição κ - μ sombreada.....	24
-----	---	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contextualização	1
1.2	Motivação.....	5
1.3	Objetivos.....	6
1.4	Estrutura do Trabalho.....	7
2	MODELOS DE DESVANECIMENTO EM CANAIS DE RADIOFREQUÊNCIA..	9
2.1	Modelos de desvanecimento de pequena escala	10
2.1.1	Distribuição Nakagami- m	10
2.1.2	Distribuição α - μ	13
2.1.3	Distribuição κ - μ	15
2.2	Modelos de desvanecimento de larga escala	17
2.2.1	Distribuição Log-normal.....	18
2.2.2	Distribuição Gamma	19
2.3	Modelos de desvanecimento composto	20
2.3.1	Nakagami- m /Gamma	20
2.3.2	κ - μ sombreado	23
2.3.3	α - μ / α - μ	26
2.4	Conclusões.....	29
3	RÁDIO COGNITIVO	31
3.1	Rede de rádios cognitivos	33
3.2	Sensoriamento de espectro.....	35
3.2.1	Sistema de Sensoriamento do Espectro	35
3.2.2	Modelos de Sensoriamento de Espectro	38
3.2.3	Requisitos de Sensoriamento de Espectro	43
3.3	Conclusões.....	44
4	SENSORIAMENTO DE ESPECTRO EM CANAIS COM DESVANECIMENTO COMPOSTO	45

4.1	Sensoriamento de Espectro em Detectores de Energia.....	46
4.1.1	Análise em Canais Modelados pela Distribuição Nakagami- m /Gamma	47
4.1.2	Análise em Canais Modelados pela Distribuição κ - μ Som- breado	49
4.2	Sensoriamento de Espectro em Cenários Cooperativos Considerando a Incerteza do Ruído	51
4.2.1	Sensoriamento Cooperativo em Canais de Desvanecimento Composto Nakagami- m /Gamma	52
4.2.2	Sensoriamento Cooperativo em Canais de Desvanecimento Composto κ - μ Sombreado	55
4.2.3	Investigação Experimental	58
4.3	Conclusões.....	60
5	INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DA DISTRIBUIÇÃO COMPOSTA α-μ/α-μ	63
5.1	Testes de Campo	64
5.1.1	Sistema de Medição	65
5.1.2	Sistema de Transmissão.....	66
5.1.3	Sistema de Recepção	68
5.2	Investigação Experimental	70
5.2.1	PDF α - μ / α - μ	71
5.2.2	CDF α - μ / α - μ	73
5.3	Conclusões.....	74
6	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....	77
6.1	Conclusões e Contribuições.....	77
6.2	Trabalhos Futuros	79
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	80

1 Introdução

1.1 Contextualização

A rápida implantação de novos dispositivos e aplicações sem fio resultou, nas últimas décadas, em uma crescente demanda por espectro eletromagnético. Em abril de 2015, o Brasil registrou 283,52 milhões de linhas ativas na telefonia móvel, resultando em uma teledensidade de 138,94 acessos por 100 habitantes [1]. Já o serviço de televisão por assinatura fechou fevereiro de 2015 com 19,71 milhões de acessos, 1,41 milhão a mais que em fevereiro de 2014, estando presente em 29,85% dos 66,04 milhões de domicílios brasileiros [2]. Conforme o quadro de atribuição de faixas de frequências no Brasil, apresentado nas Figuras 1.1 e 1.2, os serviços móveis e a radiodifusão, que incluem a telefonia móvel e a televisão, respectivamente, consomem hoje a maior parte das faixas mais cobiçadas do espectro de rádio, que são as faixas denominadas como *Very High Frequency* (VHF) e *Ultra High Frequency* (UHF).

O atual cenário da escassez de espectro, devido em parte às tecnologias de rádio comercialmente ativas, é ilustrado pela questão recente da digitalização do sinal de televisão e do desligamento das transmissões e retransmissões analógicas na faixa de frequência de 698 MHz até 806 MHz, que compreende os canais 52 a 69 da faixa UHF. O sinal da televisão analógica, ocupante atual desta fatia do espectro eletromagnético, dará lugar ao sinal de telefonia e internet móvel. O desligamento da transmissão do sinal da televisão analógica no Brasil será um processo escalonado e gradativo, com início previsto para novembro de 2015, devendo atingir todo o território brasileiro até novembro de 2018. Findo o desligamento de cada região, as empresas de telecomunicações vencedoras do leilão desta faixa poderão transmitir o sinal de telefonia e internet móvel de Quarta Geração, o 4G, que desde 2013 é prestado na radiofrequência de 2,5 GHz [3].

Ademais, a crescente demanda por serviços de telecomunicações sem fio é ainda acompanhada da necessidade de se prover maiores taxas de transmissão de dados aos usuários, como resultado da transição de serviços de comunicação puramente de voz para aplicações do tipo multimídia, podendo envolver computação em nuvem. Tanto o aumento da quantidade de usuários quanto o aumento da taxa de transferência de dados são fatores que, considerando fixa a

tecnologia, demandam uma largura de banda maior para que sejam efetivados, todavia a alocação de uma parte maior do espectro de rádio se torna impossível à medida que a ocupação deste recurso se aproxima da completude. Desta forma, o uso eficiente do espectro eletromagnético é uma questão que exorta a atenção quanto às tecnologias e às políticas empregas atualmente.

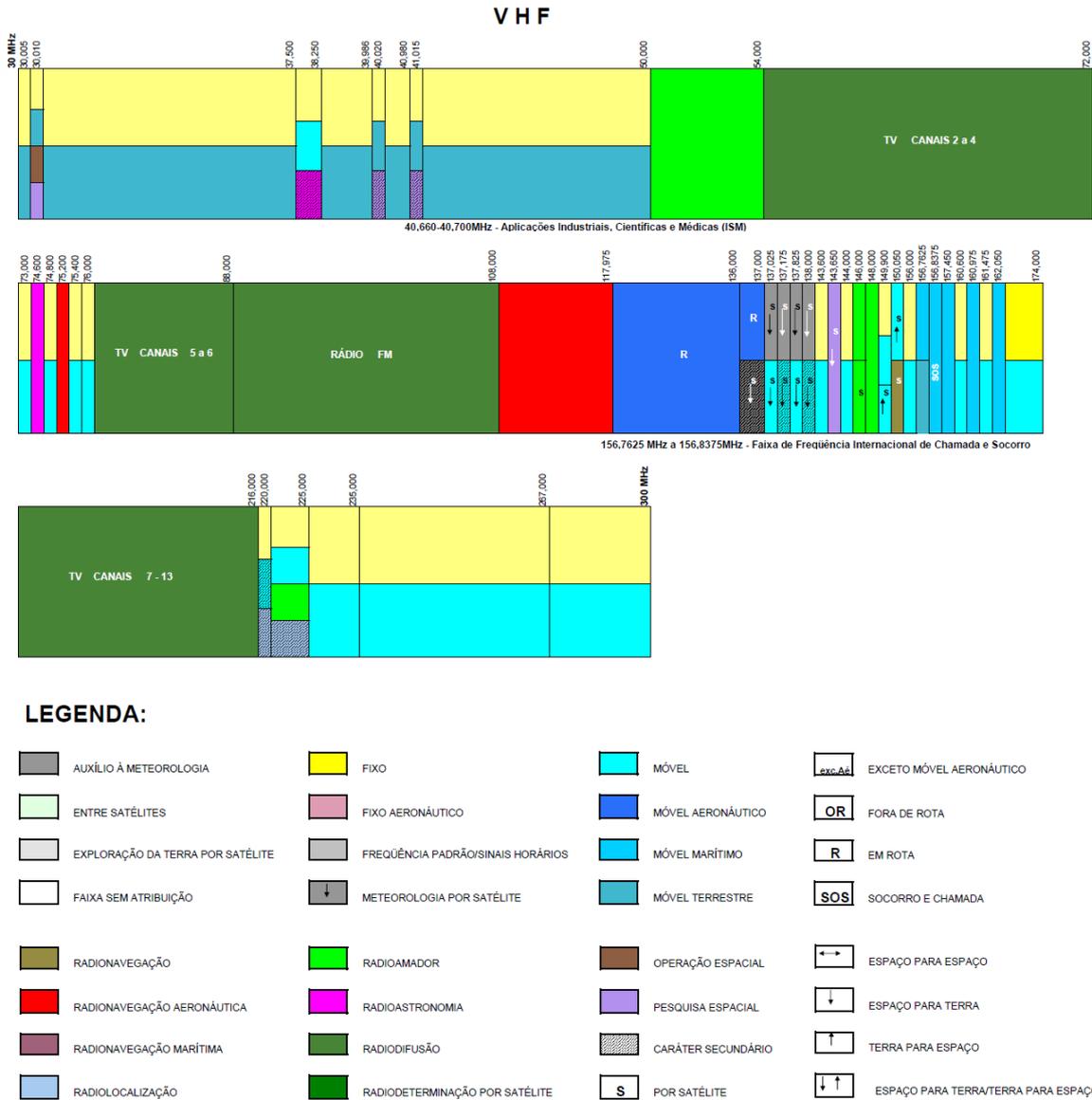
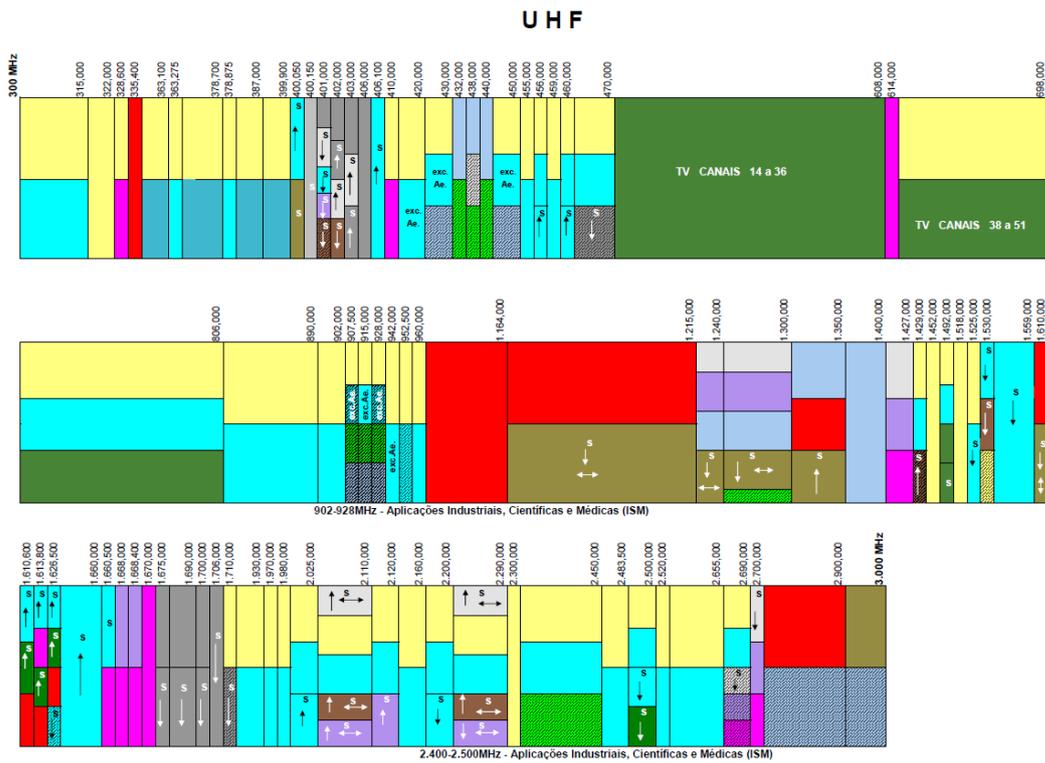


Figura 1.1: Atribuição de frequências na faixas VHF no Brasil. ANATEL, atualizado em março de 2015.

O uso dos recursos do espectro eletromagnético e a regulamentação das emissões de rádio são coordenados pelos órgãos reguladores nacionais, por exemplo, no Brasil, tais práticas são competências da Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel) e nos Estados Unidos, são atribuições da *Federal Communications Commission* (FCC). As agências reguladoras atribuem

faixas do espectro aos titulares licenciados, também conhecidos como usuários primários, comumente por um longo período de tempo e para grandes regiões geográficas. Esta política de atribuição fixa de banda de frequência adotada pelas agências se torna um obstáculo para a utilização mais eficiente do espectro, visto que uma grande porção das bandas licenciadas são severamente sub-utilizadas quando se observa a variação da ocupação das faixas de frequência por um período de tempo.



LEGENDA:

AUXÍLIO À METEOROLOGIA	FIXO	MÓVEL	EXCETO MÓVEL AERONÁUTICO
ENTRE SATÉLITES	FIXO AERONÁUTICO	MÓVEL AERONÁUTICO	FORA DE ROTA
EXPLORAÇÃO DA TERRA POR SATÉLITE	FREQUÊNCIA PADRÃO/SINAIS HORÁRIOS	MÓVEL MARÍTIMO	EM ROTA
FAIXA SEM ATRIBUIÇÃO	METEOROLOGIA POR SATÉLITE	MÓVEL TERRESTRE	SOCORRO E CHAMADA
RADIONAVEGAÇÃO	RADIOAMADOR	OPERAÇÃO ESPACIAL	ESPAÇO PARA ESPAÇO
RADIONAVEGAÇÃO AERONÁUTICA	RADIOASTRONOMIA	PESQUISA ESPACIAL	ESPAÇO PARA TERRA
RADIONAVEGAÇÃO MARÍTIMA	RADIODIFUSÃO	CARÁTER SECUNDÁRIO	TERRA PARA ESPAÇO
RADIOLOCALIZAÇÃO	RADIODETERMINAÇÃO POR SATÉLITE	POR SATÉLITE	ESPAÇO PARA TERRA/TERRA PARA ESPAÇO

Figura 1.2: Atribuição de frequências na faixas UHF no Brasil. ANATEL, atualizado em março de 2015.

Reconhecidas as limitações do espectro eletromagnético, torna-se claro que os regimes atuais de atribuição de bandas de frequência, definidos de maneira estática, não podem acomodar as exigências de um número crescente de dispositivos e de uma taxa de transmissão de dados maior. Como resultado, torna-se necessário o desenvolvimento de tecnologias inovadoras que ofereçam maneiras diferentes de exploração do espectro disponível. Em busca disto, diversas técnicas têm sido avaliadas com o intuito de aprimorar o uso do espectro de rádio e de fazer com que os serviços de telecomunicações absorvam toda a demanda promovendo, ao mesmo tempo, boa qualidade de serviço ao usuário. O rádio cognitivo surgiu como uma possível solução para o problema do congestionamento do espectro por meio do uso oportunista das faixas de frequências que não são fortemente ocupadas por usuários licenciados.

Em 2000, o termo rádio cognitivo foi definido pela primeira vez na literatura por Joseph Mitola III [4]. O rádio cognitivo é considerado uma abordagem promissora para melhorar a eficiência de utilização dos recursos do espectro de rádio [5] e tem recebido uma atenção crescente nos últimos anos, uma vez que equipa os dispositivos sem fio da capacidade de adaptarem os seus parâmetros de operação de acordo com as interações com o ambiente que o circunda. Seu funcionamento se baseia no acesso oportunista ao meio de comunicação, buscando aproveitar as porções do espectro que não estão ocupadas durante um intervalo de tempo. No entanto, para que o dispositivo oportunista, chamado de usuário secundário, possa acessar as faixas de frequência desocupadas dentro do espectro licenciado, deve-se garantir que não haverá interferência nas operações do usuário primário do canal.

Uma das principais tecnologias de rádio cognitivo é o sensoriamento de espectro [5]. Por meio do sensoriamento espectral, o rádio cognitivo é capaz de detectar sinais no canal de comunicação em tempo real e em um amplo espectro de frequências a fim de determinar se existem lacunas espectrais com oportunidade de acesso. A partir das lacunas identificadas, o rádio cognitivo deve executar um processo de escolha para transmitir oportunisticamente na porção de banda mais apropriada, considerando os seus requisitos de qualidade e de características espectrais [6].

A boa caracterização de um canal de comunicação é um ponto chave na avaliação do desempenho das redes de comunicação e de grande relevância para o processo de adaptação dos parâmetros de transmissão a ser realizado pelos rádios cognitivos. Dos fenômenos que ocorrem com o sinal de rádio no meio de propagação, o desvanecimento de pequena escala, que

considera os múltiplos percursos que o sinal pode percorrer até chegar a antena receptora, e o desvanecimento de larga escala, que considera o sombreamento gerado por grandes obstáculos, são modelados por várias distribuições estatísticas, devido a natureza estocástica de ambos. Diversas distribuições foram propostas a fim de modelar o desvanecimento de pequena escala, nomeadamente, os modelos Rayleigh [7], Nakagami- m [8], Rice [9], α - μ [10], κ - μ [11], η - μ [11] e para modelar o desvanecimento de larga escala as distribuições Log-normal e Gamma se mostraram adequadas [12].

Em muitos canais de comunicação reais, entretanto, estes dois fenômenos ocorrem simultaneamente, resultando em ambientes com desvanecimento composto [13]. Portanto, apesar da utilidade indiscutível dos modelos estatísticos mencionados, a sua eficácia é limitada a caracterização de apenas um dos fenômenos que degradam o sinal. Em outras palavras, estas distribuições não retratam simultaneamente os efeitos dos múltiplos percursos e do sombreamento [12]. Com base nisto, notou-se a necessidade dos modelos estatísticos compostos e várias distribuições foram propostas [12, 14–16].

As pesquisas recentes buscam o desenvolvimento de tecnologias de comunicação inovadoras que possam explorar o espectro de rádio de uma forma mais inteligente e flexível. Neste contexto, o estudo desenvolvido nesta dissertação pretende contribuir com a investigação, análise e avaliação de um dos esquemas de sensoriamento de espectro — a detecção de energia — utilizando a modelagem do desvanecimento composto em canais de comunicação sem fio.

1.2 Motivação

Uma análise detalhada do espectro eletromagnético permite observar que algumas bandas do espectro encontram-se pouco ocupadas na maior parte do tempo e outras encontram-se parcialmente ocupadas. Tal fato permite que se leve em consideração a existência de oportunidades espectrais, definida como uma banda de frequência licenciada para um dado usuário, mas que, em determinados horários e em determinadas localizações geográficas, não está sendo utilizada pelo usuário licenciado. A utilização do espectro pode ser melhorada significativamente quando é permitido que um usuário não licenciado acesse a oportunidade espectral nos períodos e na localização em questão [17].

Para que se possa explorar as oportunidades espectrais faz-se necessário o uso de sistemas

de comunicação sem fio inteligentes que saibam usufruir das oportunidades espectrais eficientemente. A utilização destes sistemas inteligentes – sistemas de rádio cognitivo – exige que sejam feitas análises e avaliações que auxiliem a implantação deste tipo de rede. O rádio cognitivo introduz uma nova política de acesso oportunista ao espectro de frequências nos sistemas de comunicações. Técnicas de acesso dinâmico ao espectro eletromagnético surgiram como uma das mais recentes propostas para resolver os problemas de ineficiência do uso do espectro, por meio da capacidade de compartilhamento do canal de comunicação entre usuários licenciados e não-licenciados. Para permitir a efetiva realização deste compartilhamento, faz-se necessário o sensoriamento espectral.

Para não causarem interferência, os rádios realizam o sensoriamento do espectro e, a partir dos dados coletados do ambiente, decidem se há usuário licenciado ativo em cada frequência. O sensoriamento pode ser feito isoladamente por cada dispositivo inteligente ou eles podem se organizar em uma rede cooperativa, na qual compartilham informações em prol de uma decisão conjunta. Redes deste tipo promovem detecções mais confiáveis, mas trazem complexidades adicionais.

Diante da utilidade dos rádios cognitivos e também da complexidade deste tipo de sistema, é necessário que se estude o comportamento das redes sem fio em regime de sensoriamento espectral em canais desvanecidos, modelados por distribuições mais realísticas, a fim de que se possa avaliar o desempenho de sistemas de sensoriamento de espectro e validar os modelos de desvanecimento compostos existentes além de contribuir para a predição do comportamento de redes com sensoriamento de espectro.

1.3 Objetivos

Este estudo se propõe à análise de sistemas de sensoriamento espectral em canais Nakagami- m /Gamma e κ - μ sombreado. Ademais, explora-se a validade dos modelos de desvanecimento compostos mais recentes. Desta forma, este trabalho tem por objetivo:

- Descrever um sistema de sensoriamento de espectro baseado na técnica de detecção de energia;
- Analisar o funcionamento das redes de rádios cognitivos, avaliando suas características

de funcionamento e suas métricas de desempenho em canais desvanecidos;

- Explorar as possibilidades de utilização de modelos de desvanecimento compostos, que modelam os efeitos dos desvanecimentos de pequena e de larga escala;
- Obter a formulação das métricas probabilísticas referentes ao sistema de sensoriamento de espectro para canais Nakagami- m /Gamma e κ - μ sombreado;
- Investigar o comportamento de sistemas de sensoriamento espectral em canais submetidos aos desvanecimentos compostos Nakagami- m /Gamma e κ - μ sombreado;
- Investigar o comportamento de sistemas de sensoriamento espectral em regime cooperativo em canais Nakagami- m /Gamma e κ - μ sombreado;
- Avaliar a utilidade dos modelos de desvanecimentos compostos Nakagami- m /Gamma e κ - μ sombreado, por meio de comparações gráficas com dados de campo;
- Investigar experimentalmente o modelo de desvanecimento composto α - μ / α - μ .

1.4 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está organizado em seis capítulos. Os Capítulos 2 e 3 apresentam a revisão bibliográfica necessária ao desenvolvimento e compreensão do trabalho, tais capítulos se prestam ao fornecimento de úteis informações a respeito de sistemas de comunicação sem fio, seus aspectos e características. O Capítulo 2 apresenta os modelos de canal, detalhando suas características e seu comportamento mediante a alteração dos parâmetros de desvanecimento. São especificados modelos de desvanecimento de pequena escala e modelos de desvanecimento de larga escala. Finalmente, apresentam-se os modelos de desvanecimento compostos. O Capítulo 3 contextualiza os recentes avanços e as futuras perspectivas a respeito dos sistemas de telecomunicações utilizando a tecnologia de rádios cognitivos. Técnicas de sensoriamento espectral são apresentadas detalhadamente.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados referentes à análise de desempenho de sistemas de sensoriamento espectral em canais submetidos aos modelos de desvanecimento compostos Nakagami- m /Gamma e κ - μ sombreado, são também feitas comparações do comportamento do modelo teórico com dados de campo. O Capítulo 5 explora a investigação prática do modelo

de desvanecimento composto $\alpha\text{-}\mu/\alpha\text{-}\mu$. Os resultados objetivam a validação das expressões teóricas da distribuição estatística $\alpha\text{-}\mu/\alpha\text{-}\mu$. O desempenho de tal modelo generalizado é investigado segundo as características de cada ambiente.

Por fim, o Capítulo 6 tem por objetivo a exposição das conclusões finais do trabalho e das principais contribuições deste aos sistemas de sensoriamento espectral, e a indicação de sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros que acrescentem valor ao estudo explorado.

2 Modelos de Desvanecimento em Canais de Radiofrequência

A propagação de ondas de rádio em canais sem fio é um fenômeno complexo caracterizado por uma diversidade de fenômenos, como os multipercursos e o sombreamento. Os fenômenos referentes à multiplicidade de percursos e ao sombreamento são definidos como desvanecimento de pequena escala e desvanecimento de larga escala, respectivamente. O desvanecimento de pequena escala pode ser encontrado na literatura com o nome de desvanecimento de curto prazo ou desvanecimento rápido enquanto que o desvanecimento de larga escala recebe também os nomes de desvanecimento de longo prazo ou desvanecimento lento. Uma descrição matemática exata destes fenômenos é desconhecida ou extremamente complexa para o tratamento da análise dos sistemas de comunicação. No entanto, esforços consideráveis têm sido dedicados à modelagem estatística e à caracterização destes efeitos. O resultado é um conjunto de modelos estatísticos relativamente simples e suficientemente precisos para modelar canais com desvanecimento que dependem do ambiente de propagação.

A distinção entre o desvanecimento de larga escala e o desvanecimento de pequena escala é importante para a modelagem matemática de canais de comunicação sem fio e para a avaliação do desempenho dos sistemas de comunicação que operam por meio destes canais. Esta distinção está relacionada com o tempo de coerência do canal, T_c , que mede o período de tempo durante o qual o processo de desvanecimento é correlacionado. Em outras palavras, o tempo de coerência quantifica o período de tempo após o qual a função de correlação de duas amostras da resposta do canal tomados na mesma frequência, mas em diferentes instantes de tempo se torna menor que um limiar pré-determinado. O desvanecimento é dito desvanecimento lento se o tempo de duração de símbolo T_s é menor do que o tempo de coerência do canal T_c ; caso contrário, o desvanecimento é considerado como rápido [13].

O desvanecimento de pequena escala está relacionado com o comportamento aleatório das componentes que chegam ao receptor oriundas de múltiplos percursos. Devido à diferença de amplitude e à defasagem entre as componentes de multipercursos, ocorrem variações rápidas na intensidade do sinal recebido. No desvanecimento de larga escala, um nível de desvanecimento em particular irá afetar muitos símbolos sucessivos, o que leva à propagação de erros

de decodificação, enquanto que o desvanecimento de pequena escala descorrelaciona símbolo a símbolo.

A avaliação de canais de comunicação sem fio pressupõe a possibilidade de explorar o comportamento dos canais por meio de modelos probabilísticos, que descrevem estatisticamente os efeitos dos desvanecimentos de pequena e de larga escala. Desta forma, modelos de canais são úteis para que se possa investigar detalhadamente o comportamento de sistemas de comunicação quando sujeitos às variações do ambiente de propagação. As próximas seções visam descrever os modelos de desvanecimento necessários à compreensão do estudo desenvolvido nos próximos capítulos.

2.1 Modelos de desvanecimento de pequena escala

Nos sistemas de comunicação que o sinal que chega à antena do rádio receptor é composto pela soma de várias ondas oriundas de diversas direções e com atrasos diferentes, é dito que o canal de comunicação sofre os efeitos dos multipercursos. Este fenômeno, chamado de desvanecimento de pequena escala, resulta em flutuações rápidas na intensidade do sinal de rádio. As ondas que chegam de direções diferentes e com atrasos distintos são resultado do espalhamento e das várias reflexões que o sinal pode sofrer até alcançar a antena do rádio receptor.

O desvanecimento de pequena escala pode ocorrer em dois cenários distintos: o primeiro ocorre quando não há linha de visada direta entre o transmissor e o receptor e portanto, o sinal recebido é resultado da soma das ondas de multipercursos; o segundo cenário ocorre quando há linha de visada direta entre as antenas de transmissão e de recepção e o sinal recebido é a soma de uma componente dominante do sinal com vários outros sinais de menor intensidade provenientes dos múltiplos percursos.

2.1.1 Distribuição Nakagami- m

A distribuição Nakagami- m é em essência uma distribuição qui-quadrado (χ^2) central em que m é o parâmetro de desvanecimento [13]. A distribuição de Nakagami foi introduzida por Nakagami no início do ano de 1940 para caracterizar o desvanecimento de pequena escala nos canais da faixa denominada *High Frequency* (HF) para enlaces de longas distâncias. A distribui-

ção de Nakagami foi projetada para ajustar dados empíricos e é conhecida por proporcionar uma correspondência mais próxima a alguns dados experimentais do que a distribuição de Rayleigh, Rice ou log-normal.

O modelo Nakagami- m tem sua aplicabilidade bem avaliada a ambos os modos de propagação: ionosférico e troposférico. A tradicional distribuição Nakagami- m modela sinais compostos por *clusters* de ondas de multipercursos que se propagam em ambientes sem linha de visada. De uso bastante difundido, a função de densidade de probabilidade (PDF) Nakagami- m que descreve a magnitude do envelope (r) do sinal recebido para $R > 0$, é definida como [8]

$$f_R(r) = \frac{2}{\Gamma[m]} \left(\frac{m}{\Omega}\right)^m r^{2m-1} \exp\left[-\frac{m}{\Omega}r^2\right], \quad (2.1)$$

em que $\Omega = E[r^2]$ é valor médio da envoltória do sinal, no qual $E[\cdot]$ denota o operador esperança, $\Gamma(x) = \int_0^\infty t^{x-1}e^{-t} dt$ é a função Gamma [18], $m = \frac{E^2[r^2]}{V[r^2]}$ representa a quantidade de clusters de multipercursos podendo assumir qualquer valor de 0.5 a ∞ e $V[\cdot]$ denota o operador variância.

A função densidade de probabilidade Nakagami- m em função da relação sinal-ruído (RSR) do sinal pode ser obtida por meio de algumas manipulações algébricas, fazendo a correta substituição de variáveis conforme [19] e é dada por

$$f_\Gamma(\gamma) = \frac{1}{\Gamma[m]} \left(\frac{m}{\bar{\gamma}}\right)^m \exp\left[-m\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}\right], \quad (2.2)$$

em que γ representa a relação sinal-ruído e $\bar{\gamma}$ representa a relação sinal-ruído média.

A distribuição Nakagami- m pode modelar condições de desvanecimento que são mais ou menos severas do que o desvanecimento de Rayleigh. Quando $m = 1$ a distribuição de Nakagami torna-se a distribuição de Rayleigh, quando $m = 0.5$, torna-se a distribuição de Gauss unilateral, e quando $m \rightarrow \infty$, a distribuição torna-se um impulso, ou seja, um canal sem desvanecimento. Além disto, a distribuição de Rice pode ser aproximada adequadamente usando a seguinte relação entre o fator k de Rice e o fator m de Nakagami: $m = \frac{(k+1)^2}{2k+1}$ [20].

O comportamento da distribuição Nakagami- m em função da variação do parâmetro m é ilustrado graficamente pelas Figuras 2.1 e 2.2 que apresentam duas condições diferentes de RSR média. Nota-se que um canal pouco desvanecido é caracterizado por valores mais altos do parâmetro m .

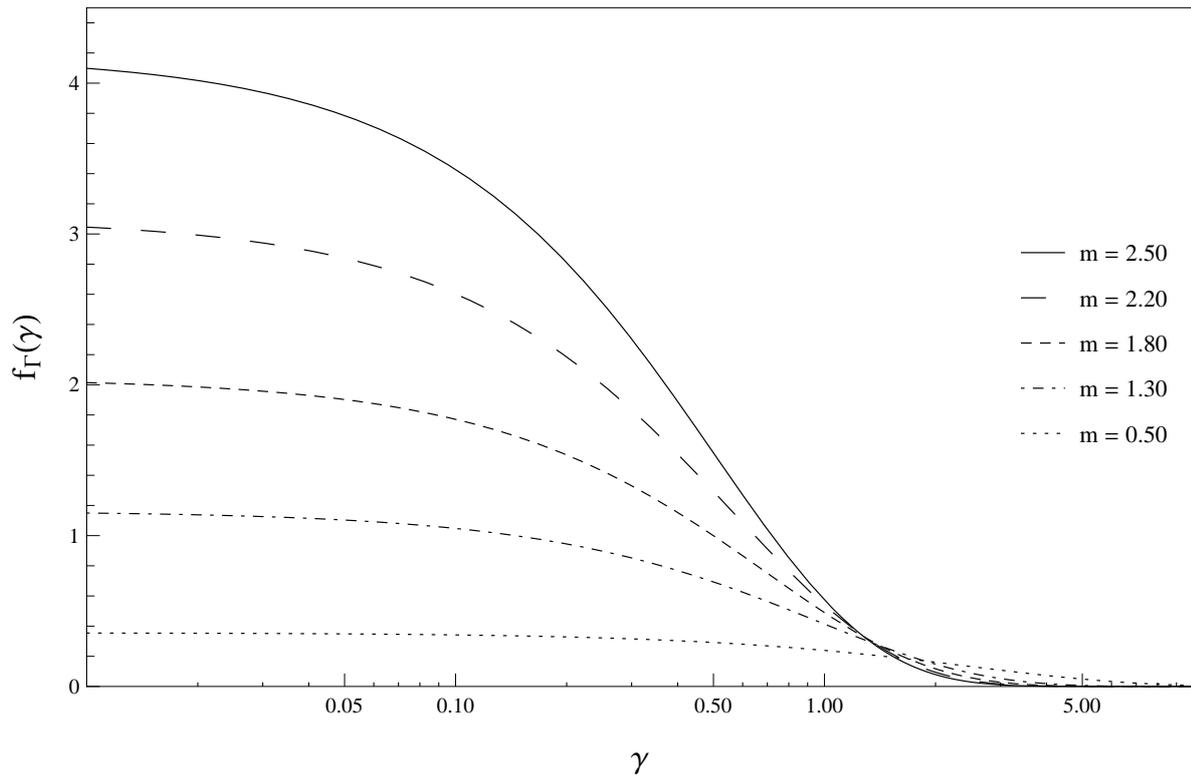


Figura 2.1: Função de Densidade de Probabilidade Nakagami- m com $\bar{\gamma} = 1.00$ dB.

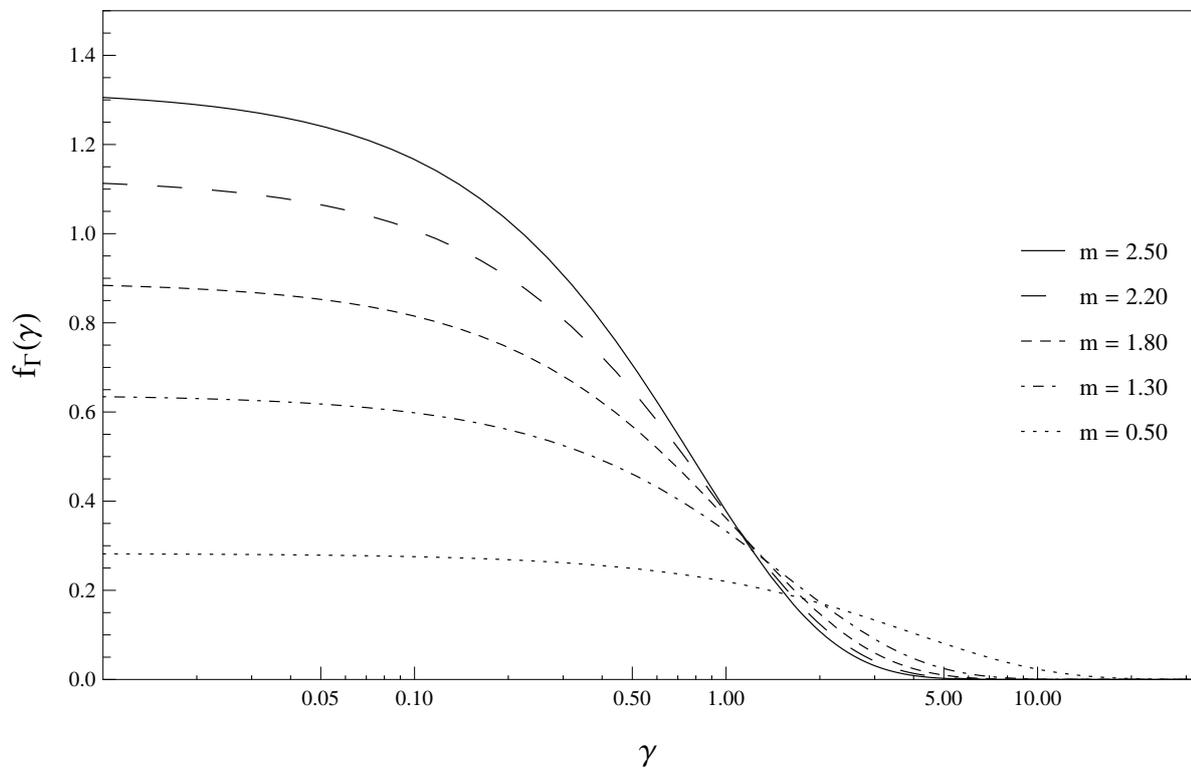


Figura 2.2: Função de Densidade de Probabilidade Nakagami- m com $\bar{\gamma} = 3.00$ dB.

2.1.2 Distribuição α - μ

A distribuição α - μ é uma distribuição generalizada muito útil para a modelagem de canais submetidos ao desvanecimento de pequena escala [21]. Sua formulação considera que o sinal é composto por *clusters* de multipercursos que se propagam em um ambiente heterogêneo. Seja a variável aleatória $R \geq 0$ a magnitude do envelope do sinal modelado pela distribuição α - μ , a função de densidade de probabilidade $f_R(r)$ de R é expressa conforme [10]

$$f_R(r) = \frac{\alpha \mu^\mu}{\Gamma[\mu]} \frac{r^{\alpha\mu-1}}{\hat{r}^{\alpha\mu}} \exp \left[-\mu \left(\frac{r}{\hat{r}} \right)^\alpha \right], \quad (2.3)$$

em que $\alpha > 0$ representa o parâmetro de não-linearidade, $\mu = \frac{E^2[r^\alpha]}{V[r^\alpha]} > 0$ representa o número de *clusters* de multipercursos, $\hat{r} \triangleq \sqrt[\alpha]{E[R^\alpha]} = \frac{\bar{r} \sqrt[\alpha]{\mu \Gamma[\mu]}}{\Gamma[\mu + \frac{1}{\alpha}]}$ e $\bar{r} = E[R]$.

A distribuição α - μ pode ser obtida em função da relação sinal-ruído por meio de algumas manipulações algébricas, fazendo a correta substituição de variáveis conforme [19] e é dada por

$$f_\Gamma(\gamma) = \frac{\alpha \mu^\mu \gamma^{\frac{\alpha\mu}{2}-1}}{2 \Gamma[\mu] \bar{\gamma}^{\frac{\alpha\mu}{2}}} \exp \left[-\mu \left(\frac{\gamma}{\bar{\gamma}} \right)^{\frac{\alpha}{2}} \right]. \quad (2.4)$$

A distribuição α - μ inclui como casos especiais outras distribuições importantes [22]. Pela atribuição de $\alpha = 2$, a distribuição Nakagami- m é obtida, com o parâmetro m especificado como $m = \mu$. A distribuição de Weibull pode ser obtida selecionando $\mu = 1$, com α representando o parâmetro de desvanecimento de Weibull. Para $\mu = 1$, a distribuição exponencial negativa e a distribuição de Rayleigh podem ser obtidas fazendo $\alpha = 1$ e $\alpha = 2$, respectivamente. Finalmente, a distribuição Gamma pode ser obtida por meio de uma mudança de variável, fazendo $\alpha = 1$ e μ representando o parâmetro de desvanecimento.

O comportamento da distribuição α - μ em função da variação dos parâmetros α e μ é ilustrado graficamente pelas Figuras 2.3 e 2.4. A distribuição α - μ apresenta flexibilidade em situações que nenhuma das distribuições tradicionais se ajustam [10]. Verifica-se que valores mais baixos de ambos os parâmetros (α e μ) retratam canais de comunicação com desvanecimento mais severo.

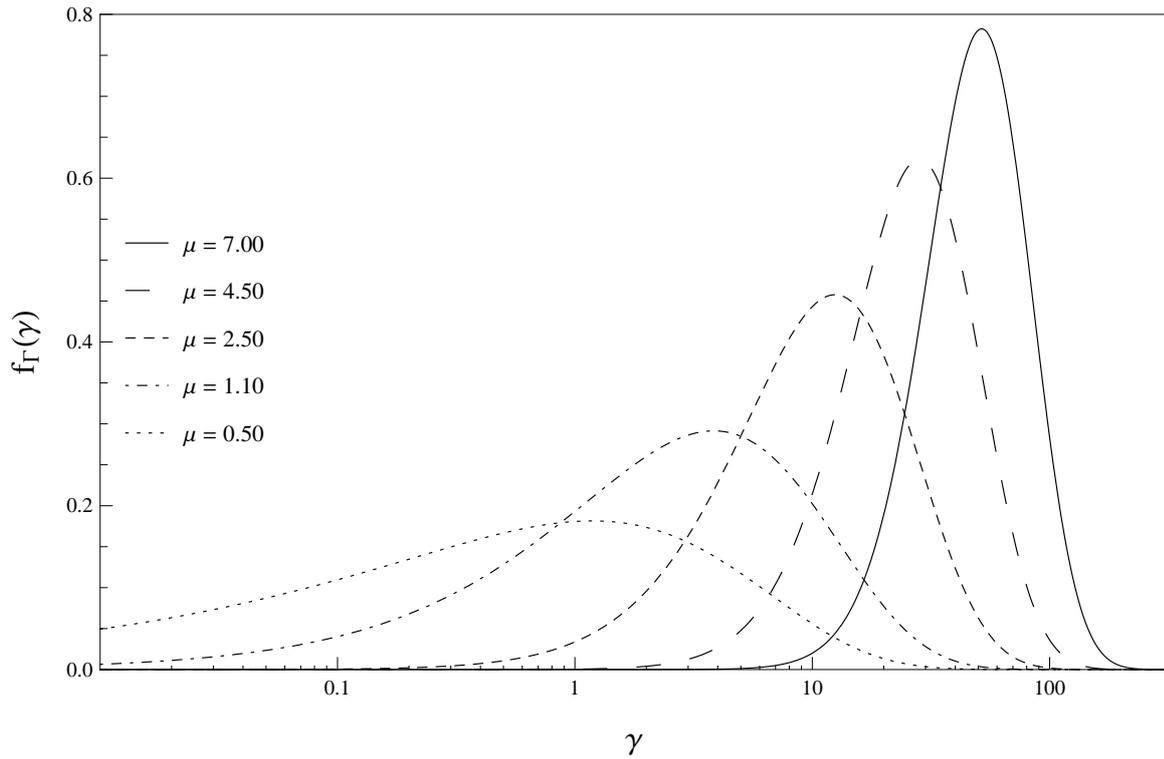


Figura 2.3: Função de Densidade de Probabilidade α - μ com $\alpha = 1.50$ e $\bar{\gamma} = 3.00$ dB.

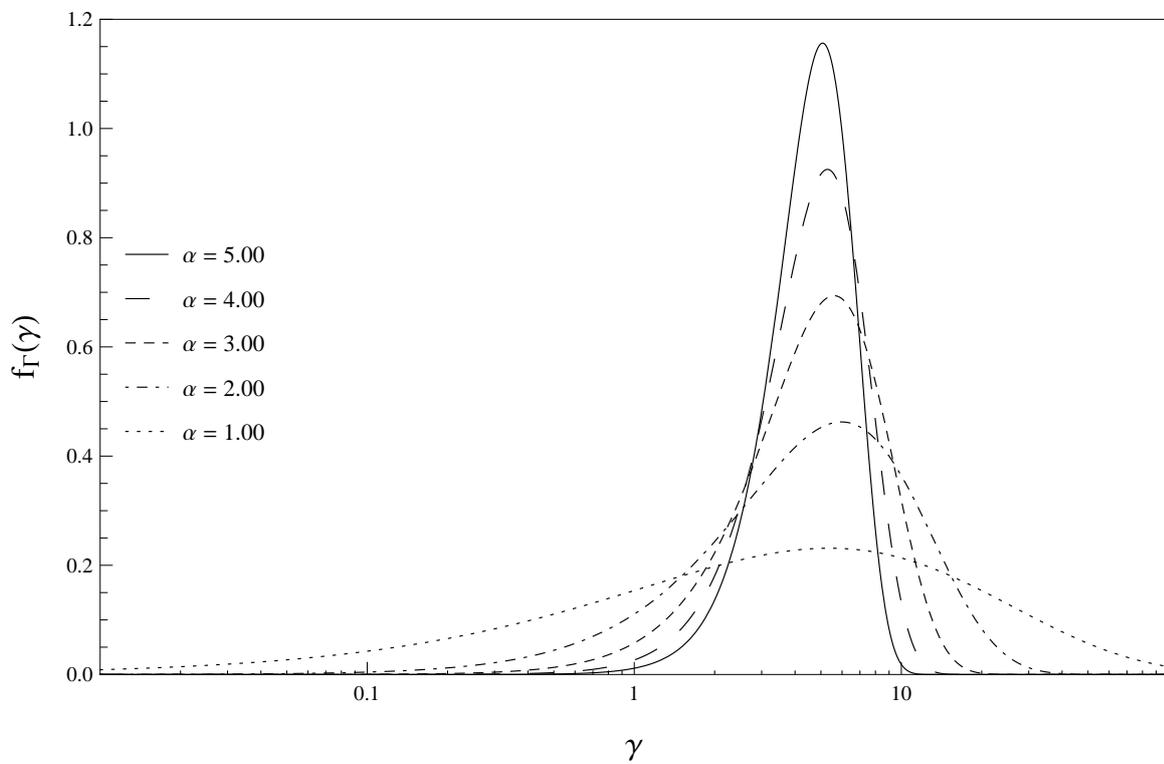


Figura 2.4: Função de Densidade de Probabilidade α - μ com $\mu = 1.50$ e $\bar{\gamma} = 3.00$ dB.

2.1.3 Distribuição κ - μ

A distribuição κ - μ é uma distribuição de desvanecimento generalizada que pode ser usada para representar a variação em pequena escala do sinal em canais de comunicação com linha de visada direta [11]. Os *clusters* de multipercursos possuem ondas dispersas com potências idênticas e dentro de cada *cluster* há uma componente dominante que apresenta uma potência arbitrária. O parâmetro κ é definido como a razão entre a potência total das componentes dominantes do sinal e a potência total das componentes espalhadas, o parâmetro μ , por sua vez, indica o número de *clusters* de multipercursos.

Considerando que a variável aleatória $R \geq 0$ representa a envoltória de um sinal submetido ao desvanecimento de pequena escala modelado pela distribuição κ - μ , a função densidade de probabilidade, $f_R(r)$ é expressa pela Equação (2.5), conforme [11].

$$f_R(r) = \frac{2\mu(1+\kappa)^{\frac{\mu+1}{2}}}{\kappa^{\frac{\mu-1}{2}} \exp[\mu\kappa]} \frac{1}{\hat{r}} \left(\frac{r}{\hat{r}}\right)^\mu \exp\left[\mu(1+\kappa)\left(\frac{r}{\hat{r}}\right)^2\right] I_{\mu-1}\left[2\mu\sqrt{\kappa(1+\kappa)}\frac{r}{\hat{r}}\right] \quad (2.5)$$

em que $\kappa > 0$, $\mu > 0$, $I_\nu[\cdot]$ é a função Bessel modificada de primeiro tipo e ordem ν e $\hat{r} = \sqrt{E[R^2]}$.

A função densidade de probabilidade κ - μ em função da relação sinal-ruído, é expressa como [11]

$$f_\Gamma(\gamma) = \frac{\mu(1+\kappa)^{\mu+\frac{1}{2}}}{\kappa^{\frac{\mu-1}{2}} \exp[\mu\kappa]} \frac{\gamma^{\frac{\mu-1}{2}}}{\bar{\gamma}^{\frac{\mu+1}{2}}} \exp\left[-\mu(1+\kappa)\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}\right] I_{\mu-1}\left[2\mu\sqrt{\kappa(1+\kappa)}\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}\right]. \quad (2.6)$$

A distribuição κ - μ inclui, como casos especiais, outras distribuições importantes. Fazendo $\kappa \rightarrow 0$ a distribuição Nakagami- m é obtida, especificando $m = \mu$. A distribuição de Rice pode ser obtida pela configuração de $\mu = 1$, com κ representando o parâmetro k de Rice.

O comportamento da distribuição κ - μ em função da variação dos parâmetros κ e μ é ilustrado graficamente pelas Figuras 2.5 e 2.6, fixando os valores de κ e de μ , respectivamente. A análise dos gráficos mostra que o canal de comunicação é melhor para valores mais altos de κ e de μ visto que o desvanecimento é mais suave nestes cenários.

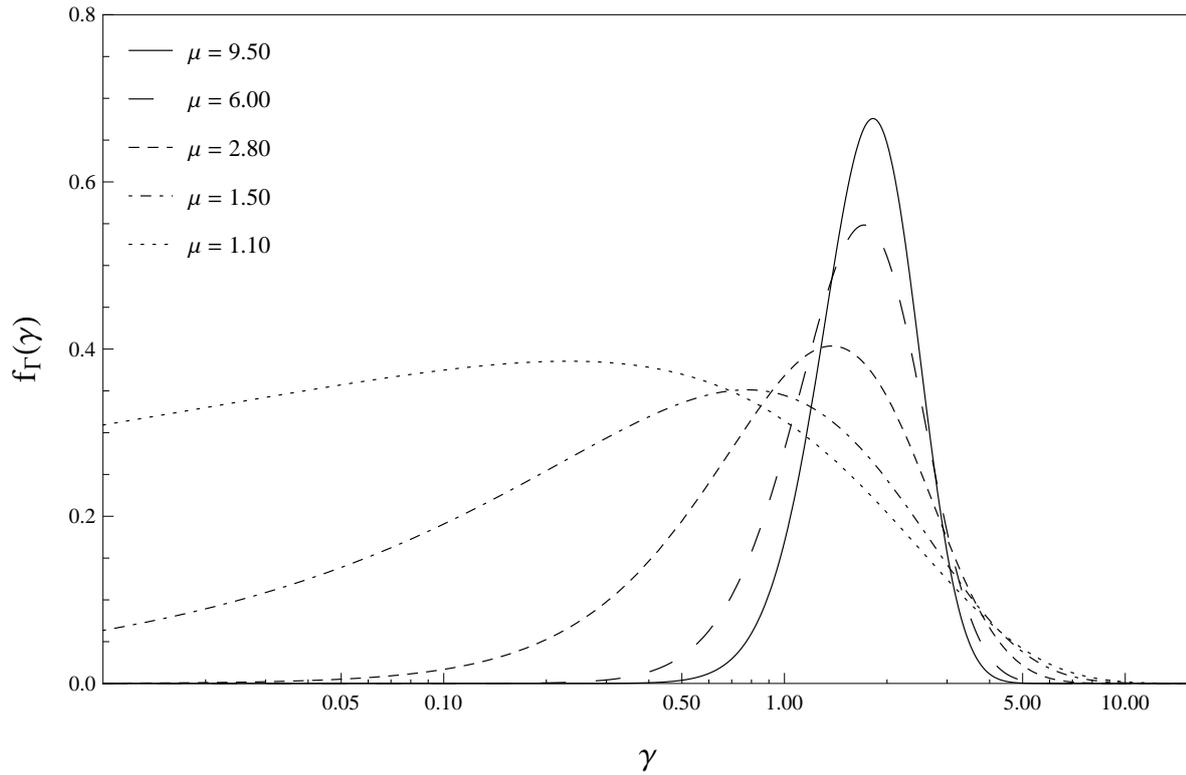


Figura 2.5: Função de Densidade de Probabilidade κ - μ com $\kappa = 0.50$ e $\bar{\gamma} = 3.00$ dB.

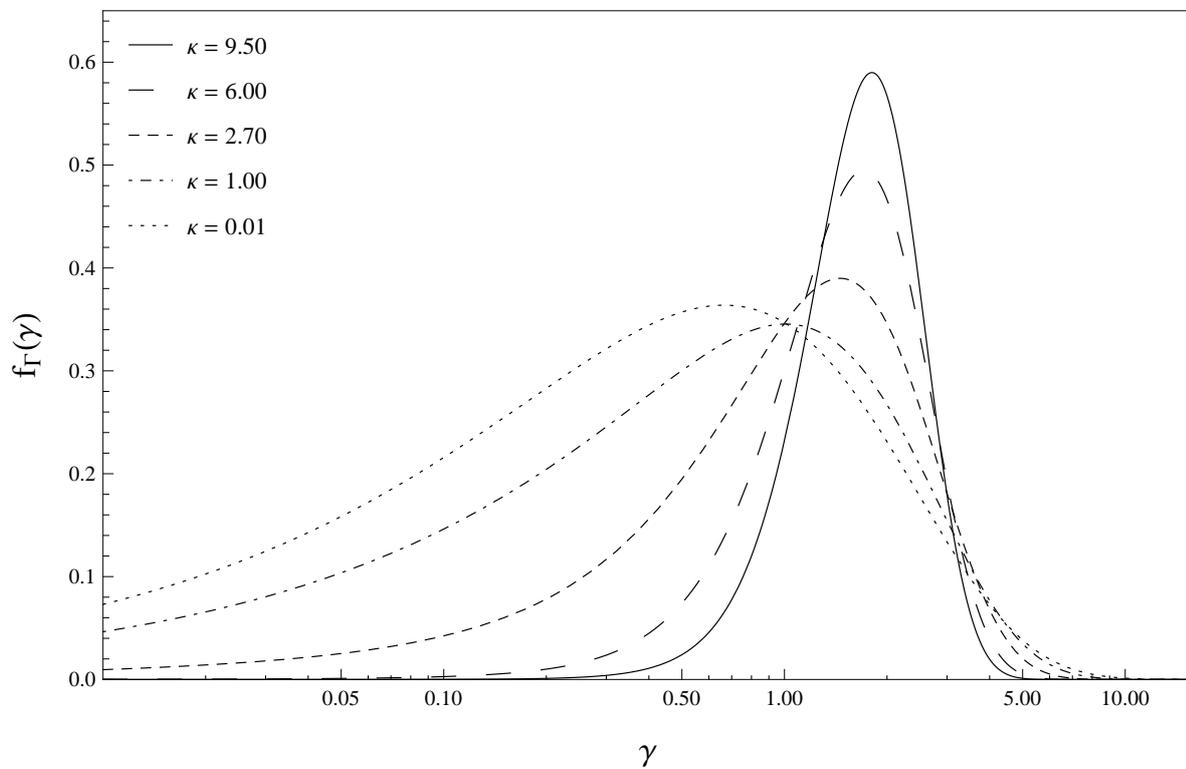


Figura 2.6: Função de Densidade de Probabilidade κ - μ com $\mu = 1.50$ e $\bar{\gamma} = 3.00$ dB.

2.2 Modelos de desvanecimento de larga escala

Em sistemas de comunicação sem fio terrestres ou em sistemas de comunicação por satélite, a qualidade do sinal de dados é afetada pela variação lenta do nível médio do sinal devido ao desvanecimento de larga escala – ou sombreamento – causado por obstáculos presentes no canal [13]. Este efeito pode ser visualizado na Figura 2.7, a curva de cor azul representa a intensidade de um sinal de rádio e a curva vermelha mostra a variação de larga escala do sinal, ambos em função do tempo.

De modo geral, o desvanecimento de larga escala está associado com as características de propagação que manifestam seus efeitos no sinal ao longo de médias a grandes distâncias quando comparadas ao comprimento de onda do sinal propagante. O desvanecimento de larga escala pode ocorrer devido às alterações do meio de propagação, à existência de obstáculos e à presença de obstruções no percurso entre o elemento transmissor e o elemento receptor, que criam uma região de sombra eletromagnética, atenuando o nível do sinal transmitido.

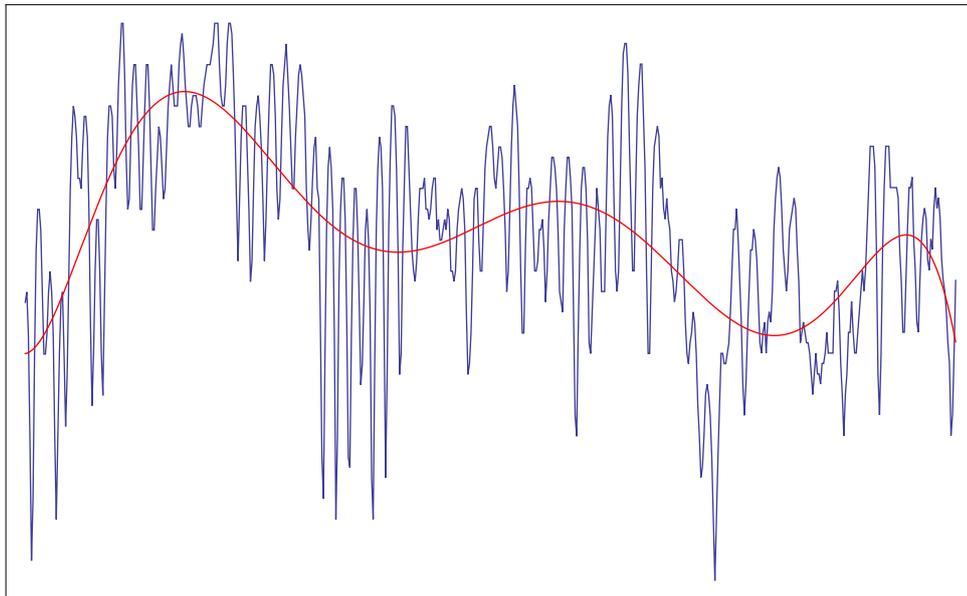


Figura 2.7: Sinal de rádio recebido sob os efeitos do desvanecimento.

Para prever com confiabilidade a cobertura de qualquer sistema celular móvel, é fundamental que o sombreamento seja levado em consideração. Para o processo de *handover*, por exemplo, a margem de intensidade de sinal conhecida como histerese para fazer a troca de célula é determinada pelo estudo de sombreamento no sistema, já que este parâmetro determina a variação da intensidade do sinal ao longo da borda da célula [23].

2.2.1 Distribuição Log-normal

Com base em medições empíricas, existe um consenso geral de que o sombreamento pode ser modelado por uma distribuição log-normal para vários ambientes *outdoor* e *indoor*, caso em que a relação sinal-ruído por símbolo tem uma função densidade de probabilidade dada pela distribuição log-normal padrão, conforme

$$p_{\Gamma}(\gamma) = \frac{\xi}{\sigma\gamma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(10\log_{10}\gamma - \bar{\gamma})^2}{2\sigma^2}\right], \quad (2.7)$$

em que $\xi = 10/\ln 10 = 4.3429$, $\bar{\gamma}$ (dB) e σ (dB) são a média e o desvio padrão de $10\log_{10}\gamma$, respectivamente [13].

Apesar da distribuição log-normal ser amplamente aceita para descrever o sombreamento, combiná-la com as distribuições que modelam multipercursos é uma tarefa complexa e de difícil manipulação em cálculos como taxa de erro de bit, esquemas de diversidade, predição de cobertura, entre outros [24]. A Figura 2.8 apresenta a variação do modelo log-normal para alguns valores de desvio padrão considerando uma RSR média de 1 dB.

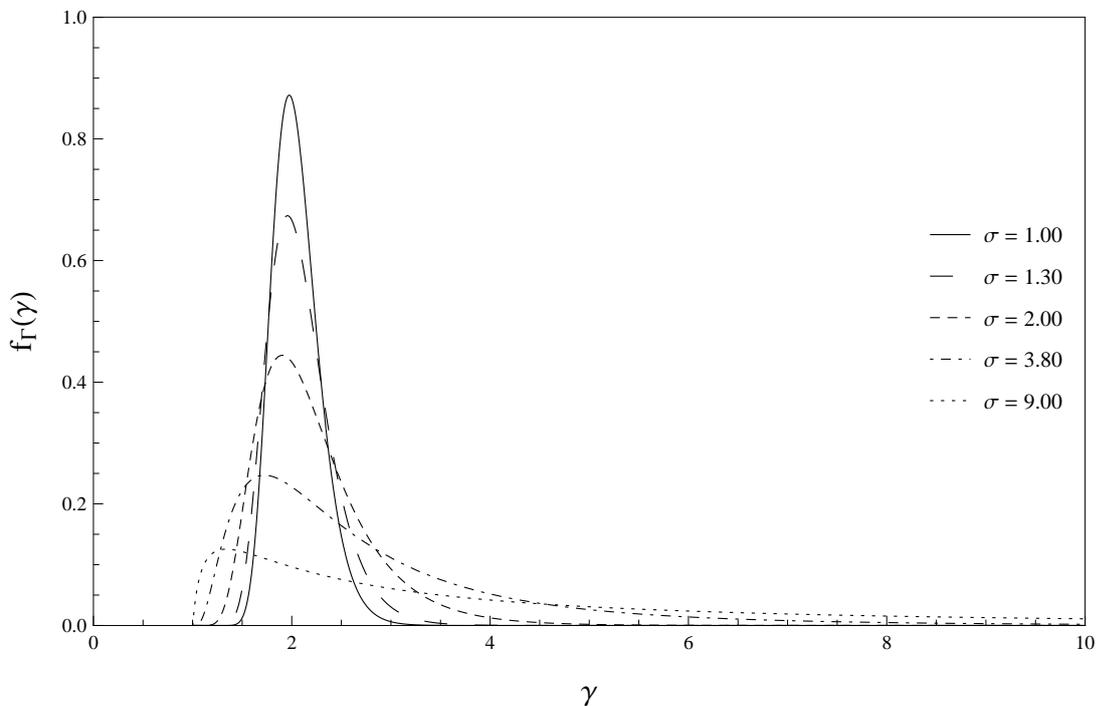


Figura 2.8: Função de Densidade de Probabilidade Log-normal com $\bar{\gamma} = 1.00$ dB.

2.2.2 Distribuição Gamma

A distribuição Gamma pode ser utilizada como uma boa aproximação da distribuição log-normal quando pretende-se obter fórmulas fechadas para o desvanecimento composto. A função de densidade de probabilidade Gamma do envelope do sinal é definida como [25]

$$f_{\Omega}(y) = \frac{1}{\Gamma[m_s]} \left(\frac{m_s}{\Omega_s} \right)^{m_s} y^{m_s-1} \exp \left[-\frac{m_s}{\Omega_s} y \right], \quad (2.8)$$

em que o parâmetro m_s representa, inversamente, o grau de severidade do sombreamento e o parâmetro Ω_s é a potência média de sombreamento.

Os valores dos parâmetros m_s e Ω_s podem ser estimados por meio das seguintes relações: $m_s = \frac{E[y]^2}{V[y]}$ e $\Omega_s = E[y]$.

O gráfico na Figura 2.9 mostra a flexibilidade que a distribuição Gamma pode apresentar. Observa-se que o parâmetro m_s é inversamente proporcional à severidade do desvanecimento no canal de comunicação, quanto maior o valor de m_s , mais suave é o desvanecimento e melhor é o canal.

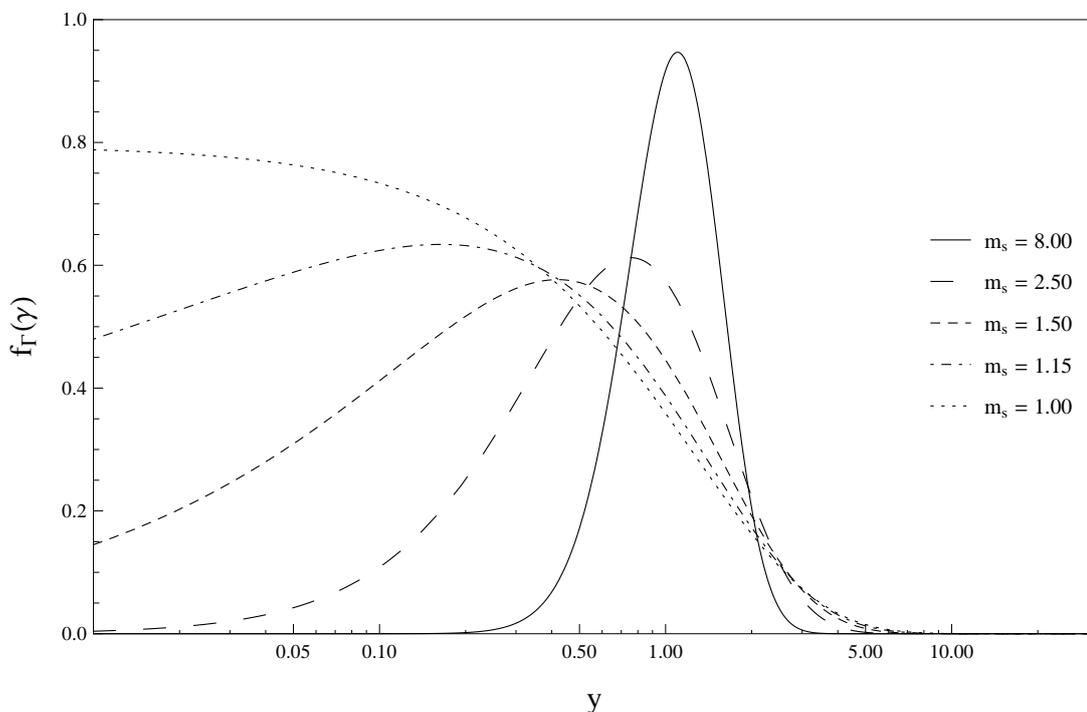


Figura 2.9: Função de Densidade de Probabilidade Gamma com $\Omega_s = 1.00$ dB.

2.3 Modelos de desvanecimento composto

Nas seções anteriores, foi visto que a modelagem do desvanecimento de sinais em canais de comunicação sem fio é normalmente realizada com a análise separada dos fenômenos que compõem o desvanecimento: algumas distribuições modelam somente o desvanecimento de pequena escala enquanto outras modelam apenas o desvanecimento de larga escala. Esta separação é útil não apenas para a melhor compreensão física de cada um dos fenômenos de propagação, mas também e principalmente, com o propósito de facilitar o projeto dos sistemas de comunicações [10]. Todavia, como estes dois fenômenos ocorrem simultaneamente em muitos canais de comunicação reais, resultando em ambientes com desvanecimento composto [13], a análise destes cenários não deve ser feita com base nestas distribuições, visto que são aplicáveis e adequadas para ambientes aproximadamente estacionários.

O desvanecimento composto é adequado para caracterizar ambientes urbanos congestionados, em que há o movimento lento de pedestres e de veículos, ou seja, os dispositivos móveis se deslocam lentamente. Este tipo de modelagem também é útil para a caracterização da comunicação em sistemas de satélites sujeitos ao sombreamento presente em áreas urbanas e/ou com vegetação [13]. Nestas configurações, o receptor não consegue mitigar os efeitos dos multipercursos por estar sujeito à variação instantânea sobreposta de um fenômeno com o outro.

As distribuições compostas surgiram para caracterizar estatisticamente o comportamento da relação sinal-ruído nestes ambientes. Existem diferentes abordagens na literatura para a obtenção destas distribuições. As seções a seguir visam apresentar as distribuições que modelam o desvanecimento composto e que são foco deste estudo bem como os passos do processo de obtenção de cada uma delas que resultam na composição dos fenômenos de longo e de curto prazo.

2.3.1 Nakagami- m /Gamma

Uma função densidade de probabilidade composta pode ser obtida por meio da sobreposição de duas ou mais distribuições estatísticas. Para isto, é necessário expressar o envelope do sinal como uma função de densidade de probabilidade condicional, $f_{X|Y}(x|y)$, e em seguida, calcular a média desta função em razão da distribuição de probabilidade da variável condicionante, $f_Y(y)$ [20]. Matematicamente, este processo é definido como

$$f_X(x) = \int_0^\infty f_{X|Y}(x|y) f_Y(y) dy. \quad (2.9)$$

Para se obter o modelo Nakagami- m /Gamma, a sobreposição é feita utilizando o desvanecimento de pequena escala modelado pela distribuição Nakagami- m e o sombreamento modelado pela distribuição Gamma [25], em que o desvanecimento de pequena escala é $f_{X|Y}(x|y)$ e o desvanecimento de larga escala é $f_Y(y)$. Fazendo $\Omega_s = y$ na Equação (2.8), o modelo composto Nakagami- m /Gamma é obtido em fórmula fechada como [26]

$$f_R(r) = \frac{4}{\Gamma[m]\Gamma[m_s]} \left(\frac{m m_s}{\Omega} \right)^{\frac{m m_s}{2}} r^{m+m_s-1} K_{m_s-m} \left[2r \sqrt{\frac{m m_s}{\Omega}} \right], \quad (2.10)$$

em que r é a envoltória instantânea do sinal, Ω é a potência média da envoltória, m é o parâmetro que representa o desvanecimento de pequena escala e m_s é o parâmetro que retrata o desvanecimento de larga escala.

De acordo com o procedimento estatístico padrão de transformação de variáveis, a função de densidade de probabilidade em função da relação sinal-ruído, $f_\Gamma(\gamma)$, do modelo de desvanecimento composto Nakagami- m /Gamma também pode ser obtida, em fórmula fechada, como

$$f_\Gamma(\gamma) = \frac{2}{\Gamma[m]\Gamma[m_s]} \left(\frac{m m_s}{\bar{\gamma}} \right)^{\frac{m m_s}{2}} \gamma^{\frac{m+m_s-2}{2}} K_{m_s-m} \left[2\sqrt{\frac{m m_s \gamma}{\bar{\gamma}}} \right], \quad (2.11)$$

em que γ e $\bar{\gamma}$ são a relação sinal-ruído instantânea e a relação sinal-ruído média, respectivamente.

Analogamente ao que ocorre com a distribuição Nakagami- m , quando $m = 1$, a distribuição Nakagami- m /Gamma torna-se a distribuição Rayleigh/Gamma. Quando $m_s \rightarrow \infty$, o sombreamento tende a se extinguir e a distribuição se aproxima da distribuição Nakagami- m .

Na distribuição Nakagami- m /Gamma, o parâmetro m mantém o seu comportamento inversamente proporcional à severidade do desvanecimento, ou seja, quanto maior m , mais suave é a condição de desvanecimento, como pode ser observado na Figura 2.10. Similarmente, a Figura 2.11 mostra que o parâmetro m_s que modela o sombreamento, também apresenta este comportamento, o sinal se torna mais determinístico à medida que m_s aumenta.

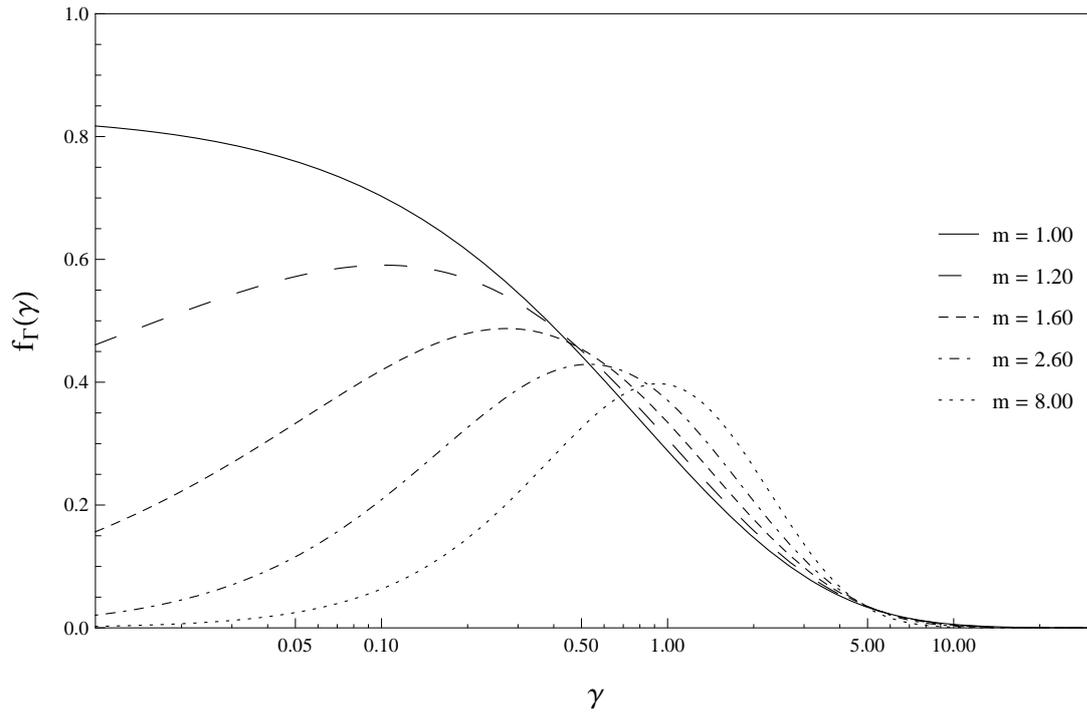


Figura 2.10: Função de Densidade de Probabilidade Nakagami- m /Gamma com $m_s = 2.50$ e $\bar{\gamma} = 3.00$ dB.

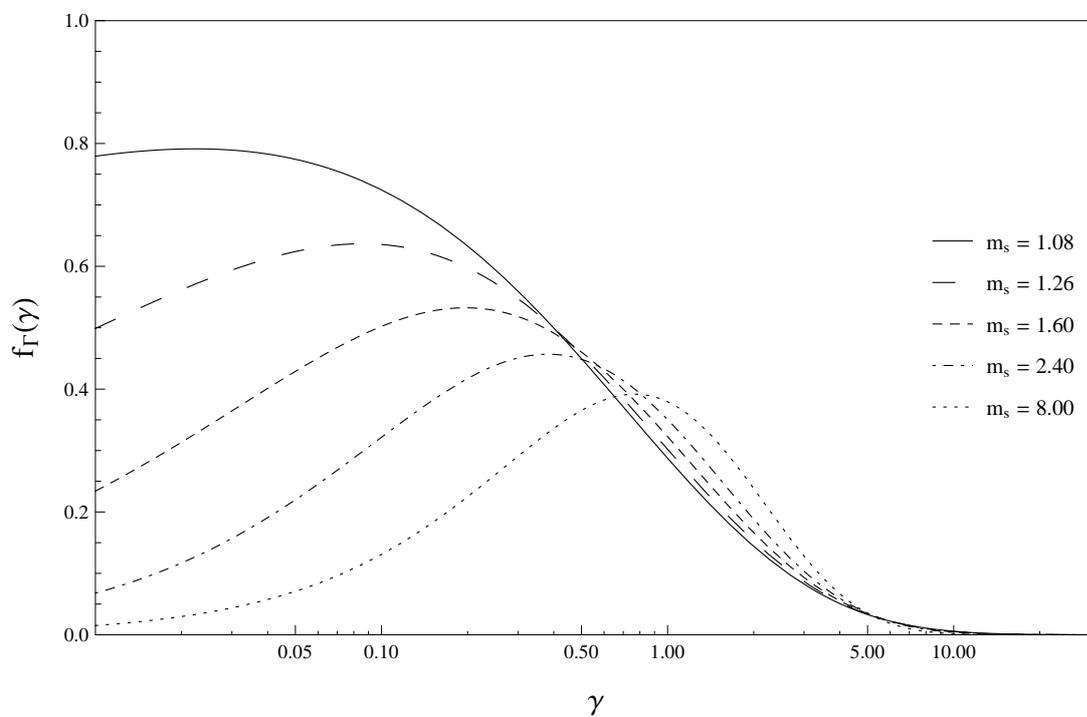


Figura 2.11: Função de Densidade de Probabilidade Nakagami- m /Gamma com $m = 2.00$ e $\bar{\gamma} = 3.00$ dB.

2.3.2 κ - μ sombreado

Em se tratando de canais de comunicação com linha de visada direta entre o transmissor e o receptor, existem duas maneiras de realizar a composição do sombreado com o efeito dos multipercursos. A primeira maneira é baseada na hipótese de que a potência total do sinal, composta pelas componentes dominantes do sinal e pelas ondas resultantes de multipercursos, está sujeita a flutuações. As distribuições derivadas utilizando este conceito são chamadas de modelos de desvanecimento sombreado multiplicativo [14]. A segunda maneira, que resulta nos chamados modelos de desvanecimento com linha de visada sombreada, consiste em assumir que apenas as componentes dominantes variam aleatoriamente, esta é a assunção utilizada na obtenção da distribuição κ - μ sombreada.

A distribuição κ - μ sombreada é um modelo generalizado de desvanecimento que representa conjuntamente as variações de pequena escala e de larga escala do sinal de rádio nas condições em que há linha de visada [14]. Do mesmo modo que na distribuição κ - μ , assume-se que no modelo κ - μ sombreado os *clusters* de multipercursos possuem ondas espalhadas com potências idênticas mas que em cada *cluster* existe uma componente dominante com potência arbitrária. Além disto, os parâmetros κ e μ são números reais não negativos e são utilizados para modelar o desvanecimento de pequena escala. Para caracterizar o sombreado, é utilizado o parâmetro m_s . A função de densidade de probabilidade da distribuição κ - μ sombreada em função da relação sinal-ruído, γ , é obtida por [14] como

$$f_{\Gamma}(\gamma) = \frac{\mu^{\mu} m_s^{m_s} (1 + \kappa)^{\mu}}{\Gamma[\mu] \bar{\gamma} (\kappa \mu + m_s)^{m_s}} \left(\frac{\gamma}{\bar{\gamma}} \right)^{\mu-1} \exp \left[-\mu (1 + \kappa) \frac{\gamma}{\bar{\gamma}} \right] {}_1F_1 \left[m_s; \mu; \frac{\kappa (1 + \kappa) \mu^2 \gamma}{\kappa \mu + m_s \bar{\gamma}} \right], \quad (2.12)$$

em que, $\kappa > 0$, $\mu > 0$, $m_s > 0$, $\bar{\gamma} = E[\gamma]$ é a relação sinal-ruído média e ${}_1F_1[\cdot; \cdot; \cdot]$ representa a função hipergeométrica [18].

A distribuição κ - μ sombreada engloba, como casos especiais, outras distribuições importantes. Algumas destas distribuições estão apresentadas na Tabela 2.1. Ao fazer $\kappa \rightarrow 0$ no modelo κ - μ sombreado e considerar que $\mu = m$, obtém-se a distribuição Nakagami- m sombreada. A distribuição Rice sombreada pode ser obtida a partir da κ - μ sombreada empregando-se $\mu = 1$ e considerando que $\kappa = k$. Além disto, ao fazer $m_s \rightarrow \infty$ na Equação (2.12), obtém-se a distribuição κ - μ [10], uma vez que o aumento do parâmetro m_s faz com que o efeito do sombreado seja reduzido.

Tabela 2.1: Casos especiais da distribuição κ - μ sombreada

Distribuição	Parâmetro		
	κ	μ	m_s
Gauss unilateral	$\kappa \rightarrow 0$	0.50	$m_s \rightarrow \infty$
Nakagami- m	$\kappa \rightarrow 0$	m	$m_s \rightarrow \infty$
Rayleigh	$\kappa \rightarrow 0$	1.00	$m_s \rightarrow \infty$
Rice	k	1.00	$m_s \rightarrow \infty$
Rice sombreada	k	1.00	m_s
κ - μ	κ	μ	$m_s \rightarrow \infty$

Fonte: [14].

As Figuras 2.12, 2.13 e 2.14 ilustram a grande variação que a distribuição κ - μ sombreada apresenta e o seu potencial de retratar inúmeros cenários de comunicação em linha de visada com desvanecimento composto. Os parâmetros κ e μ , são inversamente proporcionais à severidade do desvanecimento de pequena escala enquanto que o parâmetro m_s apresenta um comportamento inversamente proporcional à severidade do desvanecimento de larga escala.

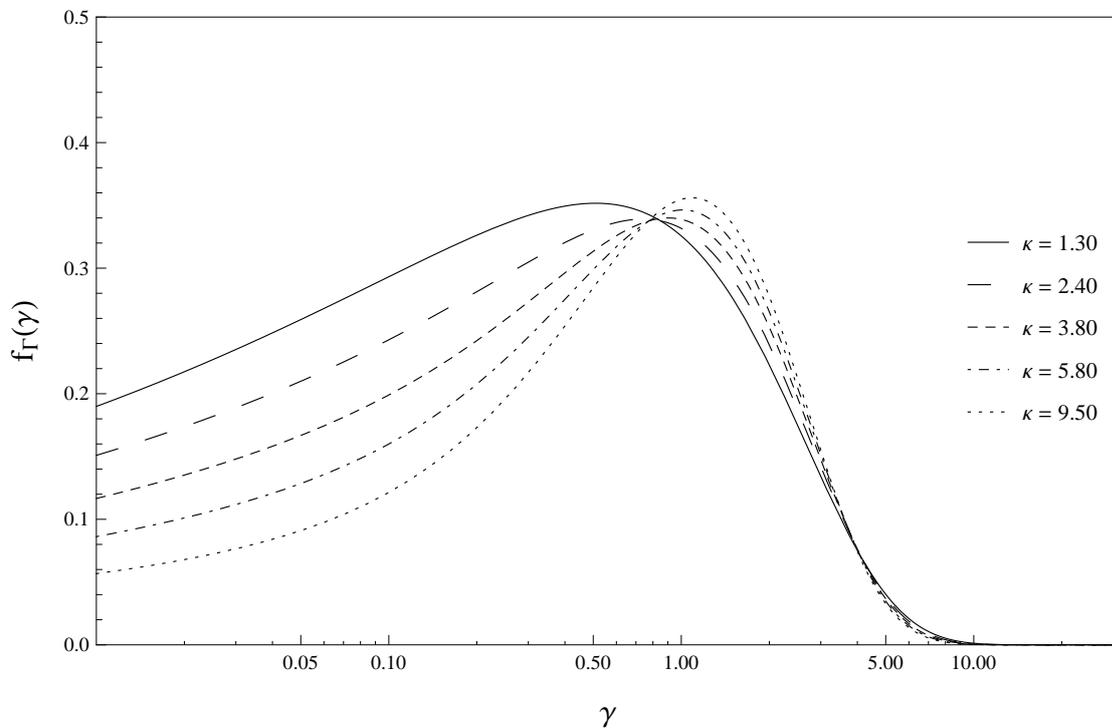


Figura 2.12: Função Densidade de Probabilidade κ - μ sombreada com $\mu = 1.20$, $m_s = 2.50$ e $\bar{\gamma} = 3.00$.

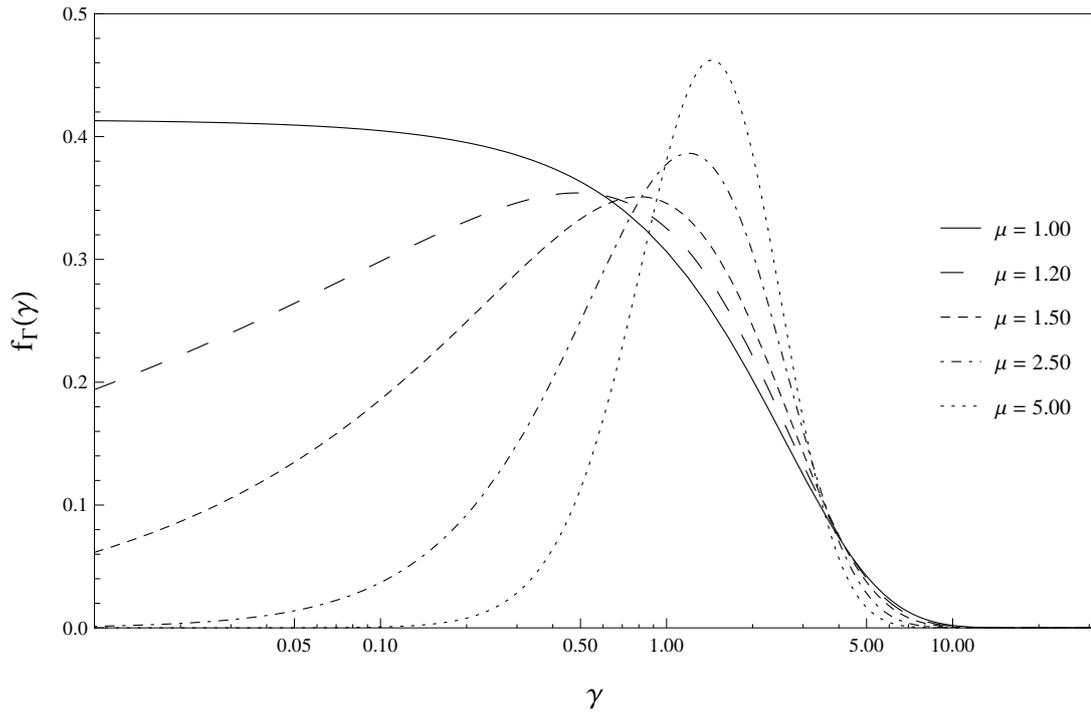


Figura 2.13: Função de Densidade de Probabilidade κ - μ sombreada com $\kappa = 1.20$, $m_s = 2.50$ e $\bar{\gamma} = 3.00$.

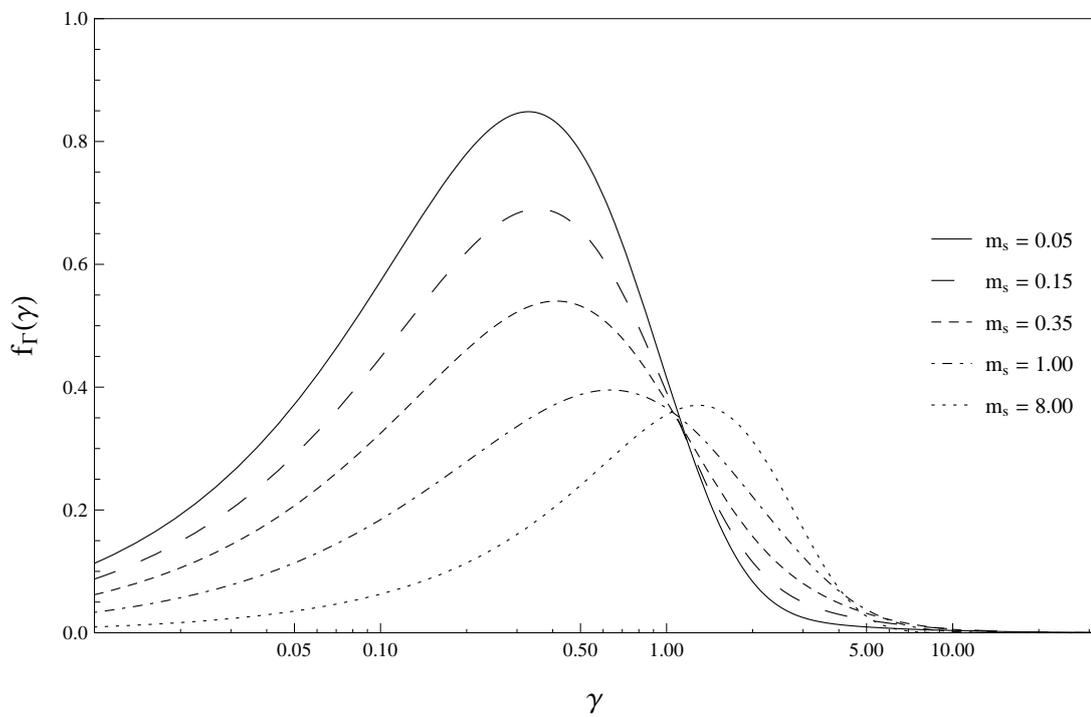


Figura 2.14: Função de Densidade de Probabilidade κ - μ sombreada com $\kappa = 1.80$, $\mu = 1.80$ e $\bar{\gamma} = 3.00$.

2.3.3 $\alpha\text{-}\mu/\alpha\text{-}\mu$

A distribuição $\alpha\text{-}\mu/\alpha\text{-}\mu$ é um resultado bastante recente na literatura usado para modelar canais com desvanecimento composto. Neste modelo, o desvanecimento de curto prazo é descrito por uma distribuição $\alpha\text{-}\mu$ cuja média é também caracterizada por uma outra distribuição $\alpha\text{-}\mu$ que descreve o desvanecimento de longo prazo. Muitas distribuições de desvanecimento composto, modelam o desvanecimento de larga escala pela distribuição log-normal e são conhecidas por tornarem o tratamento analítico muito difícil, não resultando em expressões de forma fechada. Como uma alternativa a estes modelos compostos, a distribuição $\alpha\text{-}\mu/\alpha\text{-}\mu$ foi proposta em [22] como uma ferramenta poderosa para a caracterização de canais de desvanecimento sem fio.

Assume-se que X e Y são duas variáveis aleatórias (VA) positivas e estatisticamente independentes, com valores médios $\bar{x} = E[X]$ e $\bar{y} = E[Y]$, e que $Z \triangleq X \times Y$ é seu produto. Por intermédio de procedimentos básicos de estatística concernentes a transformação de variáveis aleatórias, a função de densidade de probabilidade de Z é calculada como

$$f_Z(z; \bar{x}, \bar{y}) = \int_0^\infty \frac{1}{y} f_X\left(\frac{z}{y}; \bar{x}\right) f_Y(y; \bar{y}) dy, \quad (2.13)$$

em que $f_X(\cdot)$ e $f_Y(\cdot)$ denotam as funções de densidade de probabilidade de X e Y , respectivamente.

A função de densidade acumulada de Z pode ser calculada como

$$F_Z(z; \bar{x}, \bar{y}) = \int_0^z f_Z(t; \bar{x}, \bar{y}) dt. \quad (2.14)$$

Utilizando a Equação (2.4) com subscritos apropriados e as PDFs de X e Y com parâmetros α_x, μ_x, \bar{x} e α_y, μ_y, \bar{y} , modelando, em um certo ambiente, o desvanecimento de pequena escala e o desvanecimento de larga escala, respectivamente, a PDF composta $\alpha\text{-}\mu/\alpha\text{-}\mu$ é expressa como na Equação (2.15), fixando $\bar{x} = 1$ [22].

$$\begin{aligned} f_Z(z) = & \int_0^\infty \frac{\alpha_x \alpha_y z^{\alpha_x \mu_x - 1}}{\Gamma[\mu_x] \Gamma[\mu_y]} \left(\frac{\Gamma\left[\mu_x + \frac{1}{\alpha_x}\right]}{\bar{x} \Gamma[\mu_x]} \right)^{\alpha_x \mu_x} \left(\frac{\Gamma\left[\mu_y + \frac{1}{\alpha_y}\right]}{\bar{y} \Gamma[\mu_y]} \right)^{\alpha_y \mu_y} y^{-\alpha_x \mu_x + \alpha_y \mu_y - 1} \\ & \times \exp \left[- \left(\frac{\Gamma\left[\mu_x + \frac{1}{\alpha_x}\right]}{\bar{x} \Gamma[\mu_x]} \frac{z}{y} \right)^{\alpha_x} - \left(\frac{\Gamma\left[\mu_y + \frac{1}{\alpha_y}\right]}{\bar{y} \Gamma[\mu_y]} y \right)^{\alpha_y} \right] dy. \end{aligned} \quad (2.15)$$

Até então, não há solução analítica para a Equação (2.15). O modelo de desvanecimento composto $\alpha\text{-}\mu/\alpha\text{-}\mu$ inclui como casos especiais uma ampla variedade de modelos de compostos encontrados na literatura, tais como Nakagami- m /Gamma, Gamma/Gamma, Rayleigh/Gamma, Weibull/Gamma e aproxima-se daqueles cujo desvanecimento de grande escala é representado pela distribuição log-normal.

A fim de prover um método alternativo de se reescrever a PDF $\alpha\text{-}\mu/\alpha\text{-}\mu$, os autores do modelo propuseram assumir que $\alpha_x/\alpha_y = p/q$, em que $p \geq 1$ e $q \geq 1$ são números coprimos inteiros. Simultaneamente, fazendo $p = q = 1$ e $\alpha_x = \alpha_y = \alpha$, a forma mais reduzida da PDF do modelo composto $\alpha\text{-}\mu/\alpha\text{-}\mu$ é expressa, de forma fechada, como [22]

$$f_Z(z) = \frac{2\alpha}{z \Gamma[\mu_x] \Gamma[\mu_y]} (uz)^{(\mu_x + \mu_y) \frac{\alpha}{2}} K_{-\mu_x + \mu_y} [2(uz)^{\frac{\alpha}{2}}], \quad (2.16)$$

em que

$$u = \frac{\Gamma\left[\mu_x + \frac{1}{\alpha_x}\right] \Gamma\left[\mu_y + \frac{1}{\alpha_y}\right]}{\bar{x} \Gamma[\mu_x] \bar{y} \Gamma[\mu_y]}, \quad (2.17)$$

e $K_\nu[\cdot]$ é a função Bessel modificada de segundo tipo e de ordem ν .

Fazendo $\alpha = 1$ na Equação (2.16), o resultado simplificado corresponde ao produto de duas variáveis aleatórias com distribuição Gamma. Adicionalmente, se $\alpha = 2$ em (2.16), o resultado simplificado corresponde ao produto de duas variáveis aleatórias com distribuição Nakagami- m e se $\alpha = 2$ e $\mu_x = \mu_y = 1$ em (2.16), o resultado simplificado corresponde ao produto de duas variáveis aleatórias com distribuição de Rayleigh [22]. A função de densidade acumulada composta $\alpha\text{-}\mu/\alpha\text{-}\mu$ pode ser calculada substituindo (2.15) em (2.14), com $\bar{x} = 1$.

A flexibilidade que a distribuição $\alpha\text{-}\mu$ apresenta em situações que nenhuma das distribuições tradicionais se ajustam, faz com que o modelo $\alpha\text{-}\mu/\alpha\text{-}\mu$ seja uma ferramenta poderosa para a caracterização de canais de desvanecimento composto sem fio. Parte do comportamento e de sua adaptabilidade são apresentados nas Figuras 2.15 e 2.16. Os gráficos mostram que o comportamento de todos os parâmetros (α_x , μ_x , α_y e μ_y) é equivalente, como esperado, ao seu comportamento em sua distribuição originária.

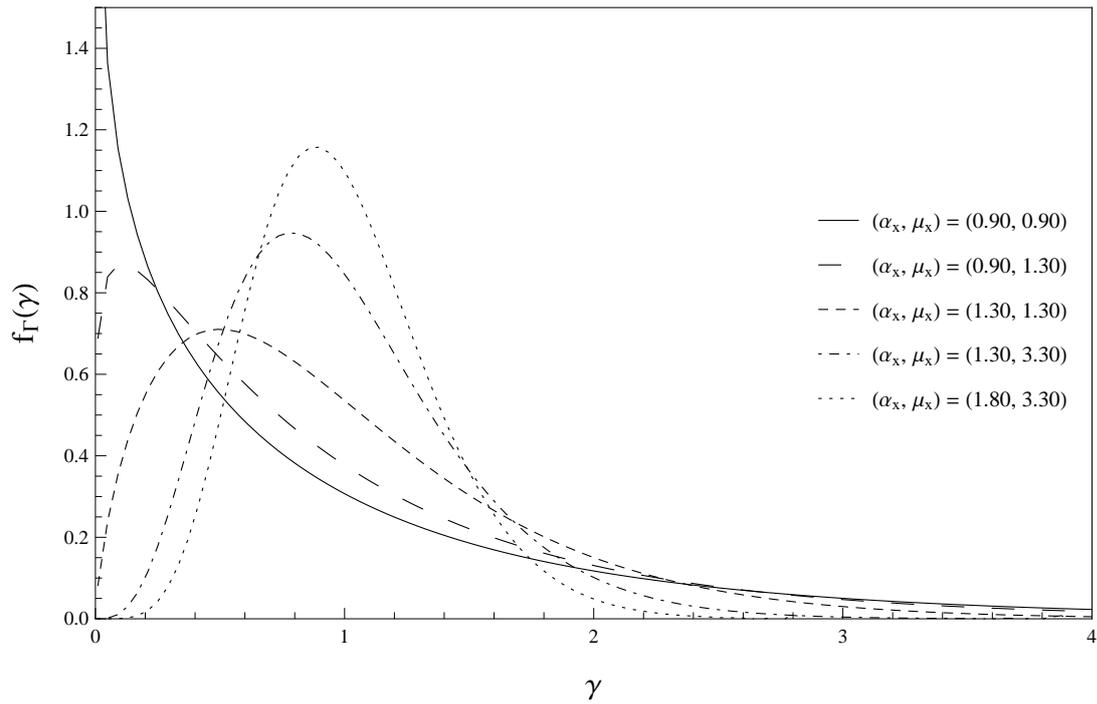


Figura 2.15: Função de Densidade de Probabilidade $\alpha-\mu/\alpha-\mu$ com $\alpha_y = 3.50$, $\mu_y = 3.00$ e $\bar{y} = 1.00$.

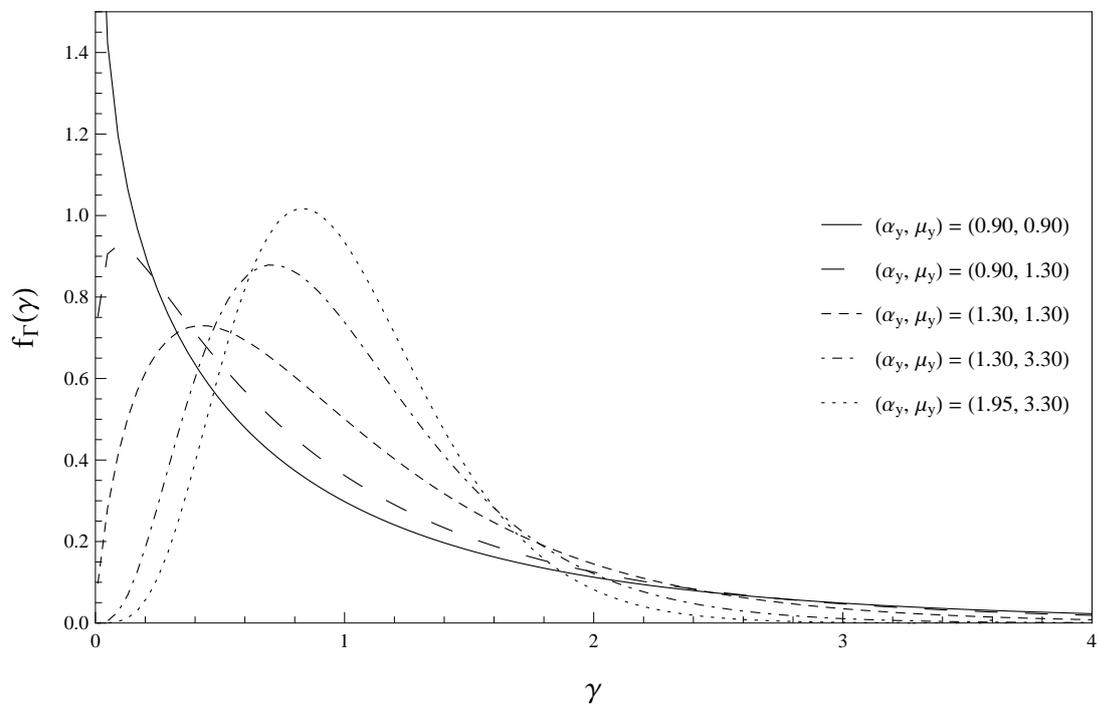


Figura 2.16: Função de Densidade de Probabilidade $\alpha-\mu/\alpha-\mu$ com $\alpha_x = 2.50$, $\mu_x = 2.00$ e $\bar{x} = 1.00$.

2.4 Conclusões

Este capítulo tem como proposta principal a apresentação dos modelos de desvanecimento de canais de comunicação em sistemas de comunicação sem fio. Nesta etapa de trabalho o foco se centra em apresentar os tipos de desvanecimento presentes em sistemas de comunicação sem fio, detalham-se também as diferenças entre desvanecimento de pequena e de larga escala. Complementarmente, são apresentados os modelos de desvanecimento de larga escala: Log-normal e Gamma, e os modelos de desvanecimento de pequena escala: Nakagami- m , α - μ e κ - μ .

Foram apresentados também os modelos de desvanecimento composto utilizados no escopo deste trabalho: As distribuições Nakagami- m /Gamma, κ - μ sombreada e α - μ / α - μ . Por fim, o estudo presente neste capítulo explora o comportamento dos modelos de desvanecimento mediante a variação dos parâmetros de cada distribuição. Pôde-se observar como a variação dos parâmetros modifica os cenários modelados por tais distribuições.

3 Rádio Cognitivo

A crescente demanda por aplicações que utilizam sistemas de comunicação sem fio determinou uma variedade de restrições sobre o uso do espectro de radiofrequências disponível, que é um recurso limitado e precioso para o estabelecimento do tráfego de dados em canais de comunicação. A atribuição fixa de espectro levou à subutilização deste recurso, uma vez que uma grande porção do espectro licenciado não é efetivamente utilizada. Rádio cognitivo é uma promissora tecnologia de comunicação sem fio que proporciona uma nova maneira de melhorar a eficiência de utilização do espectro electromagnético disponível. Um rádio cognitivo é definido como um sistema de transmissão de dados sem fio capaz de mudar seus parâmetros com base nas condições do canal de comunicação.

O rádio cognitivo tem capacidade cognitiva e de reconfiguração. Por meio da capacidade cognitiva torna-se possível sensoriar o espectro e compreender as oportunidades de disponibilidade do canal e, por meio da capacidade de reconfiguração, o sistema modifica seus parâmetros de transmissão para transmitir de maneira oportunística de acordo com os parâmetros de transmissão impostos pelo canal. Inerente aos sistemas de rádio cognitivo está a técnica de **sensoriamento de espectro** que permite que se promova a detecção de lacunas espectrais – bandas subutilizadas – proporcionando a melhoria da eficiência espectral; e a técnica de **compartilhamento de espectro**, que permite a utilização do espectro de maneira oportunística, dado que se conhecem as características do canal já sensoriado. A Figura 3.1 mostra um ciclo cognitivo básico.

Um rádio cognitivo deve ser ciente e sensível às variações em seu ambiente de operação. Desta forma, o **sensoriamento espectral** é uma importante função no ciclo cognitivo. Por meio do sensoriamento espectral, o rádio cognitivo é capaz de detectar sinais no canal de comunicação em tempo real e em um amplo espectro de frequências. Na **análise do espectro**, o rádio cognitivo avalia os dados provenientes do sensoriamento espectral a fim de determinar se há lacunas espectrais com oportunidade de acesso. A **decisão espectral** ocorre depois que as bandas espectrais disponíveis foram identificadas. Nesta etapa, o rádio cognitivo deve escolher a porção de banda mais apropriada do espectro, considerando seus requisitos de qualidade de serviço (*Quality of Service* - QoS) e suas características espectrais [6].

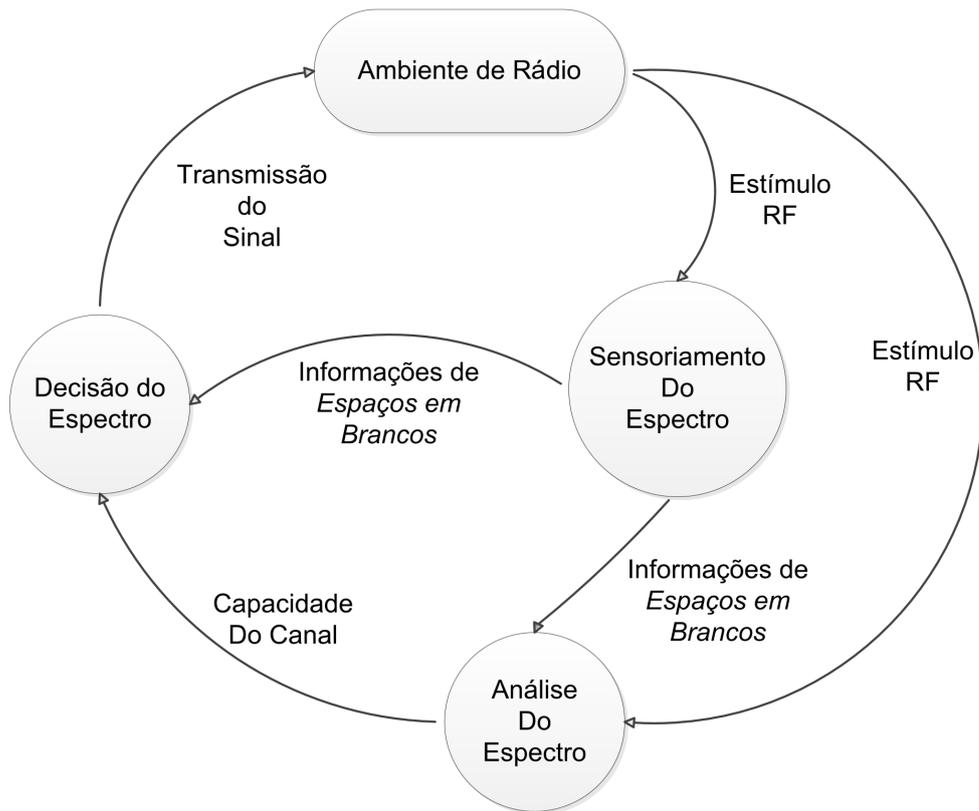


Figura 3.1: Ciclo de um sistema de rádio cognitivo [27].

O espectro de radiofrequências disponível é um recurso tecnológico limitado que está em processo de esgotamento de disponibilidade devido ao aumento do número de dispositivos e de aplicações sem fio. Verifica-se, entretanto, que o espectro alocado é pouco utilizado, pois não possui atribuição dinâmica (alocação conforme a necessidade de utilização). Ademais, a abordagem da gestão do espectro de rádio não é flexível, uma vez que, a cada operadora de sistema de comunicação sem fio é atribuída uma licença para operar em uma determinada faixa de frequência. No cenário atual, verifica-se que as bandas do espectro de radiofrequência alocadas estão livres em até 80% do tempo, o que se traduz em uma utilização de forma ineficiente, dependendo da área geográfica [28].

3.1 Rede de rádios cognitivos

Os rádios cognitivos devem ser capazes de operar em ambientes complexos. A detecção espectral, a análise espectral, o acesso oportunista ao espectro e a mobilidade espectral são as principais funções do rádio cognitivo para suportar o acesso espectral dinâmico. A formação de redes de rádios cognitivos pressupõe a existência de dispositivos com estas características para que o uso do espectro de radiofrequências seja o mais eficiente possível.

Redes de rádios cognitivos (*Cognitive Radio Network - CRN*) são redes capazes de estabelecer conexões entre os seus nós de rádios cognitivos ou entre um nó primário da rede e um nó de rádio cognitivo e ajustar seus parâmetros de transmissão para se adaptar às mudanças de topologia de rede, às mudanças no canal, às condições de funcionamento do sistema ou às necessidades dos usuários.

Em uma rede de rádios cognitivos, os nós inteligentes devem ser capazes sensoriar o canal de comunicação, determinar a disponibilidade de bandas espectrais, selecionar o melhor canal para uma transmissão oportunista, coordenar o acesso a este canal com outros usuários da rede, liberar o canal quando um usuário prioritário utilizar o canal para se comunicar e selecionar dinamicamente a rota para o destino dos dados, fazendo adaptações dinâmicas. Eles devem ainda ser capazes de adaptar seus parâmetros de transmissão e não interferir na comunicação dos usuários primários.

Em ambientes de rádio cognitivo podem coexistir dois tipos de redes, a depender do esquema de alocação do espectro de radiofrequências adotado para a faixa do espectro em análise: uma rede primária ou licenciada, detentora do direito de uso prioritário do canal; e uma rede secundária ou cognitiva, da qual fazem parte os nós de comunicação inteligentes - rádios cognitivos.

A rede primária é a rede já existente e em operação no canal. Na rede primária estão alocados os usuários licenciados - usuários primários (UP) - que operam em uma banda de frequência determinada e em um espaço geográfico específico. Os usuários primários detêm a prioridade de uso do canal, ou seja, o acesso ao canal de comunicação é, a priori, um recurso disponível aos usuários primários e suas operações não podem ser afetadas ou prejudicadas por usuários não licenciados. A rede secundária é composta por usuários que não detêm a licença para a operação no canal de comunicação - os usuários secundários (US). A rede de usuários secundários,

formada por nós inteligentes, monitora o ambiente e acessa o canal de maneira oportunista. A Figura 3.2 ilustra a arquitetura da rede de rádios cognitivos.

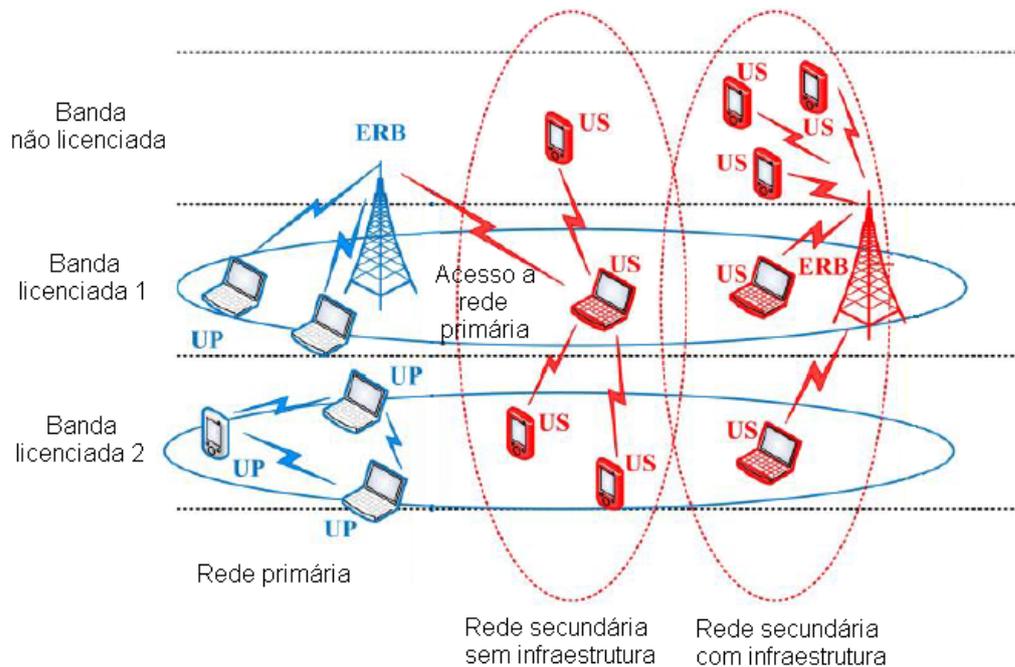


Figura 3.2: Arquitetura de uma rede de rádio cognitivo [17].

O compartilhamento espectral dinâmico é uma possibilidade de aprimoramento do uso eficiente do espectro, uma vez que permite que sistemas de transmissão inteligentes utilizem o espectro dinamicamente e acessem o canal sem causar interferências entre diferentes sistemas. O espectro pode ser compartilhado por dois modos de acesso [29]:

- **Acesso *Overlay*** que consiste na transmissão oportunista quando o canal está ocioso e o
- **Acesso *Underlay*** que consiste em uma transmissão simultânea à transmissão do usuário primário, porém, sem causar interferência significativa.

A questão da subutilização do espectro na comunicação sem fio pode ser resolvida eficientemente por meio da utilização de sistemas de rádios cognitivos. O rádio cognitivo se caracteriza como um sistema de transmissão de dados que utiliza um canal de comunicação sem fio e que pode se adaptar de acordo com o ambiente, alterando seus parâmetros de transmissão, tais como a modulação, a frequência, o formato de quadros, etc. Um dos principais desafios dos sistemas de rádios cognitivos consiste no fato de que os nós dos rádios cognitivos não devem interferir na

transmissão dos usuários licenciados e devem desocupar a banda quando necessário. Para isso, deve-se sensoriar os sinais de rádio mais rapidamente. De modo geral, as redes de rádios cognitivos impõem novos desafios de implantação, principalmente devido à sua coexistência com as redes primárias, detentoras da prioridade do canal. A fim de superar os principais desafios das redes de rádios cognitivos, tais redes devem:

- **Não interferir em enlaces primários:** Redes de rádios cognitivos devem evitar interferir nas redes primárias, a fim de promover o compartilhamento espectral eficiente.
- **Operar respeitando os requisitos de *QoS*:** Para decidir sobre uma banda de frequência apropriada, as redes cognitivas devem dar suporte a comunicações com determinada qualidade de serviço. A comunicação deve ser estabelecida adequadamente, respeitando a qualidade de serviço exigida pelo sistema em operação.

3.2 Sensoriamento de espectro

Um grande desafio na rede de rádios cognitivos é que os usuários secundários precisam detectar a presença de usuários primários em um espectro licenciado e sair da faixa de frequência o mais rapidamente possível se o usuário da rede primária surgir com uma transmissão de dados, a fim de evitar causar interferência nos usuários primários. O sensoriamento de espectro permite que haja a detecção de usuários no canal e é o primeiro passo para a implementação do sistema de rádios cognitivos.

3.2.1 Sistema de Sensoriamento do Espectro

O sensoriamento espectral atua essencialmente sobre hipóteses de decisão binárias e o canal é qualificado como ocupado ou disponível. O rádio cognitivo deve ser capaz de distinguir quais bandas estão disponíveis dentro do canal de comunicação para o uso oportunista. A decisão binária é modelada como

$$\begin{aligned} H_0 &: \text{canal ocioso} \\ H_1 &: \text{canal ocupado} \end{aligned} \tag{3.1}$$

No cenário em que o canal está ocioso, o sinal recebido é essencialmente o ruído aditivo

gaussiano branco (AWGN) presente no ambiente e no cenário em que o canal está ocupado, o sinal recebido é composto pelo sinal do usuário primário somado ao ruído ambiente, segundo

$$\begin{aligned} H_0 : y(t) &= n(t) \\ H_1 : y(t) &= h x(t) + n(t), \end{aligned} \tag{3.2}$$

em que $y(t)$ é o sinal detectado pelo usuário secundário, $x(t)$ é o sinal do usuário primário, $n(t)$ é o ruído aditivo gaussiano branco e h é o ganho do canal.

Independentemente do modelo de predição do sinal ou do detector utilizado, os erros de detecção são inevitáveis devido ao ruído aditivo típico do canal de comunicação sem fio, devido às observações limitadas e à aleatoriedade inerente aos dados observados. O alarme falso (*false alarm*) ocorre se um canal ocioso é detectado como ocupado, e a perda de detecção (*miss detection*) ocorre quando um canal ocupado é detectado como ocioso [29]. O alarme falso pode levar a uma perda de uma potencial oportunidade para a transmissão de um US. A perda de detecção, por outro lado, poderia conduzir a ocorrência de colisões da transmissão do rádio cognitivo com o UP, resultando em desperdício, tanto para a transmissão do usuário primário quanto para a transmissão do usuário secundário.

A otimização do sistema situa-se entre a necessidade de proteger o usuário primário licenciado e, ao mesmo tempo, fornecer o serviço de comunicação ao usuário secundário. O problema de otimização consiste em minimizar a probabilidade de alarme falso, sujeita a uma restrição sobre a probabilidade perda de detecção. Desta forma, o desempenho de um detector em um sistema de sensoriamento de espectro é caracterizado por três parâmetros principais: a probabilidade de perda de detecção (*miss detection probability* - P_m), a probabilidade de alarme falso (*false alarm probability* - P_f) e a probabilidade de detecção (*detection probability* - P_d), que são definidas como

$$\begin{aligned} \epsilon &= P_f = P \{ \text{Decidir } H_1 \mid H_0 \}, \\ \delta &= P_m = P \{ \text{Decidir } H_0 \mid H_1 \}, \\ 1 - \delta &= P_d = P \{ \text{Decidir } H_1 \mid H_1 \}. \end{aligned} \tag{3.3}$$

Uma característica de operação do receptor (*receiver operating characteristic* - *ROC*) típica, que é um gráfico de $1 - \delta$, a probabilidade de detecção P_d , versus P_f , é mostrada na Figura 3.3.

Diferentes ROC são obtidas escolhendo diferentes sensores, diferentes algoritmos de de-

teção ou parâmetros de processamento. A escolha do ponto de operação, no entanto, deve ser ditada pelo desempenho da camada de acesso ao meio em termos da taxa de transferência do US e a restrição de interferência para proteger o UP [29]. A operação correta de redes de rádio cognitivo, em termos de sensoriamento espectral, permite que sejam aproveitadas as oportunidades de transmissão aumentando consideravelmente a eficiência do uso espectral.

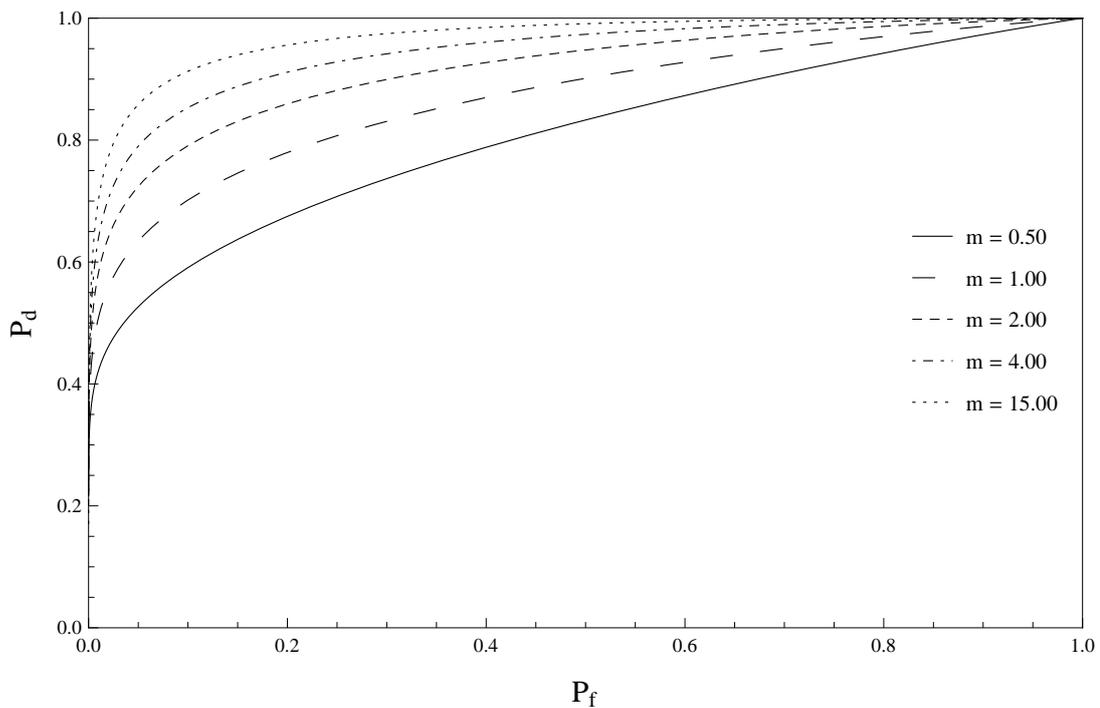


Figura 3.3: Característica de operação do receptor típica de um canal com desvanecimento Nakagami- m .

O desempenho de um único detector em sistemas de sensoriamento de espectro pode ser severamente afetado devido aos efeitos de desvanecimento, sombreamento, ou devido a existência de um sensor defeituoso. Devido à existência destes aspectos negativamente interferentes em redes de rádio cognitivo, explora-se a possibilidade de detecções cooperativas, onde as observações de múltiplos US são combinadas para melhorar o desempenho do detector.

A ideia principal do sensoriamento cooperativo é melhorar o desempenho do sistema de detecção, explorando a diversidade espacial nas observações dos usuários secundários espacialmente distribuídos. Por cooperação, os usuários secundários podem compartilhar suas informações de sensoriamento para tomar uma decisão combinada mais precisa do que as decisões individuais. A melhoria do desempenho devido à diversidade espacial é chamada de ganho cooperativo [30].

O ganho cooperativo pode também ser visto a partir da perspectiva de *hardware* do sistema de sensoriamento. Devido ao desvanecimento de multipercurso e de sombreamento, a relação sinal-ruído do sinal primário recebido pode ser extremamente pequena e a detecção se torna uma tarefa difícil e muito mais complexa em termos de processamento, exigindo mais do *hardware* do sistema. A sensibilidade do receptor indica a capacidade de detectar sinais de determinada intensidade; para sinais de baixíssima RSR será imposta ao receptor uma exigência tal que aumente a complexidade de implementação e os custos de *hardware* associados. Por outro lado, a eficácia do sistema de sensoriamento não pode ser melhorada pelo aumento da sensibilidade, quando a RSR de sinais do UP for inferior a um determinado nível. Felizmente, a exigência de sensibilidade e os problemas de limitação de *hardware* podem ser contornados consideravelmente por meio do sensoriamento cooperativo.

O ganho cooperativo não está limitado a um melhor desempenho de detecção apenas, por exemplo, se o tempo de detecção pode ser reduzido devido à cooperação, os usuários secundários terão mais tempo para a transmissão de dados, de modo a melhorar o seu rendimento [30].

Este trabalho se concentra na avaliação do sensoriamento de espectro baseado na detecção do transmissor primário. Neste contexto, há três principais técnicas de sensoriamento de espectro: Detecção de energia, Detecção mediante a avaliação das propriedades Ciclostacionárias e Método do filtro casado.

3.2.2 Modelos de Sensoriamento de Espectro

3.2.2.1 Detecção de Energia

Na técnica de detecção de energia, a energia presente em cada canal é medida pelos terminais de rádio cognitivo e comparada com um limiar. Se o valor medido for maior do que o limiar estabelecido, então considera-se que o canal está ocupado. Caso o valor medido seja inferior ao limiar, então o canal é classificado como ocioso. O sinal a ser considerado neste tipo de sensoriamento é determinístico, apesar de não haver informações mais detalhadas sobre ele. Considera-se também que a região espectral que contém o sinal submetido ao sensoriamento é conhecida a priori e que o canal está submetido ao ruído aditivo gaussiano branco, de média zero.

A suposição que permite que a presença de sinal seja detectada por meio de detectores

de energia parte do princípio que a média do sinal do usuário primário é diferente de zero. As Figuras 3.4 e 3.5 ilustram esquematicamente o algoritmo de um sistema de sensoriamento espectral utilizando detecção de energia.



Figura 3.4: Diagrama de blocos de um detector de energia. Adaptado de [28].

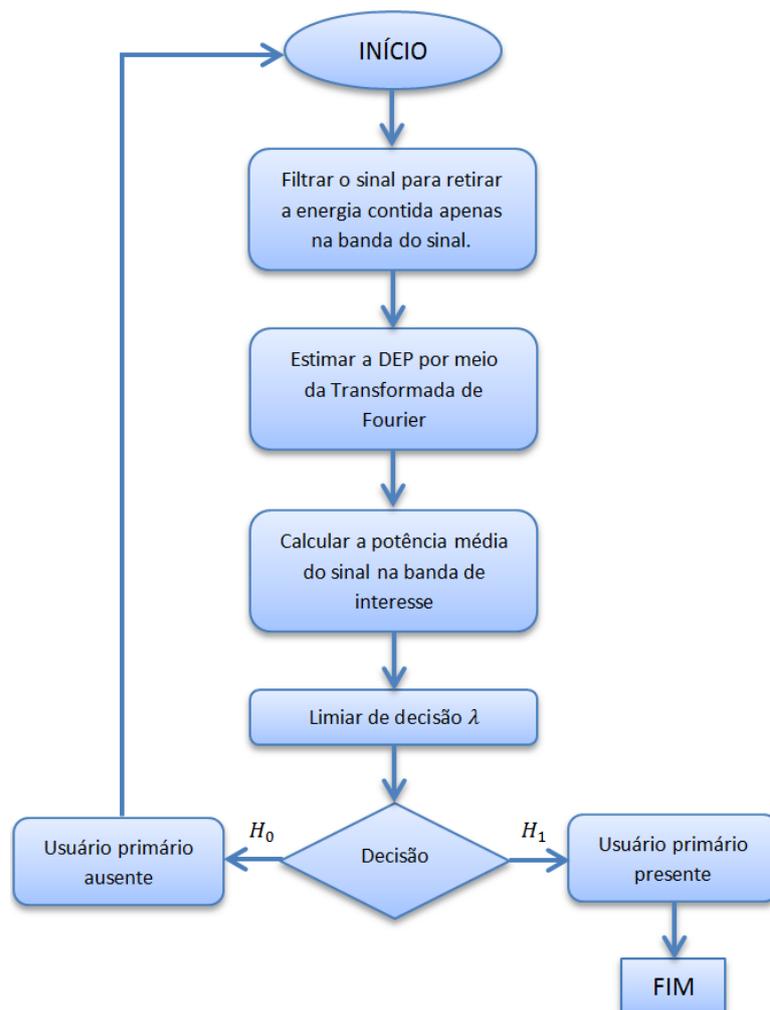


Figura 3.5: Fluxograma de um detector de energia. Adaptado de [28].

A fim de medir a energia do sinal no domínio da frequência, seleciona-se primeiramente a largura de banda de interesse do sinal recebido, por meio de um filtro passa-banda. Em seguida, realiza-se a conversão analógica/digital e faz-se a transformada rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform - FFT*). Estando o sinal convertido para o domínio da frequência, calcula-se

a média quadrática dos coeficientes sobre a banda de observação. Finalmente, de acordo com uma comparação entre a energia média e o limiar pré-determinado decide-se sobre a presença ou ausência de UP, conforme mostrado na Figura 3.4.

A detecção de energia pode ser implementada no domínio da frequência usando uma transformada de Fourier discreta (*Discrete Fourier Transform - DFT*), baseada na densidade espectral de potência (*Power Spectral Density - PSD*). A ideia é dividir a sequência de dados em segmentos com janelas. Esses segmentos de dados podem ser sobrepostos e não-sobrepostos. O uso de sensoriamento espectral com base na detecção de energia no domínio da frequência tem sido abundantemente estudado para sistemas de rádio cognitivos.

3.2.2.2 Detecção mediante a avaliação das propriedades Cicloestacionárias

Sinais modulados são, em geral, associados a portadoras senoidais, trens de pulso, sequências de salto ou prefixos cíclicos, o que resulta em uma periodicidade embutida nestes sinais e que pode ser extraída e inspecionada por meio da análise de Fourier [27].

Na técnica cicloestacionária, os terminais de rádio cognitivo realizam a análise da transformada de Fourier da autocorrelação do sinal medido em cada um dos canais, comparando o resultado com a assinatura espectral das possíveis tecnologias que possam ocupar a banda de frequência. A função de correlação espectral diferencia a energia do ruído da energia de um sinal modulado, uma vez que o ruído não possui correlação e os sinais modulados são cicloestacionários com correlação espectral. Esta técnica apresenta um melhor desempenho com relação à probabilidade de detecção e de alarme falso quando comparada com a técnica de detecção de energia, porém o tempo necessário para o processamento é elevado, o que pode inviabilizar sua utilização para tomadas rápidas de decisão. As Figuras 3.6 e 3.7 ilustram esquematicamente o algoritmo de um sistema de sensoriamento espectral mediante a avaliação das propriedades cicloestacionárias.



Figura 3.6: Diagrama de blocos da análise cicloestacionária. Adaptado de [28].

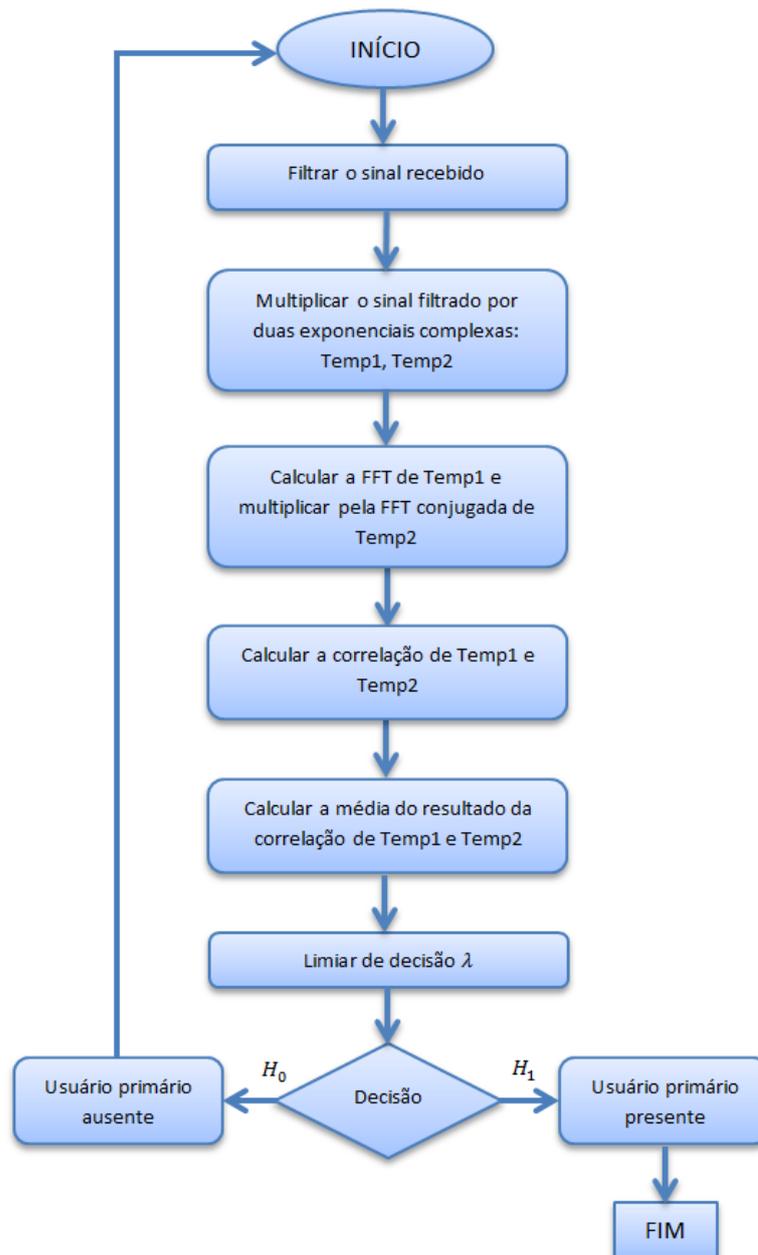


Figura 3.7: Fluxograma da análise cicloestacionária. Adaptado de [28].

3.2.2.3 Método de Filtro Casado

Um filtro casado é um filtro linear concebido para maximizar o sinal de saída da relação sinal-ruído para um dado sinal de entrada. Quando o usuário secundário tem, a priori, o conhecimento do sinal do usuário principal, a detecção de filtro casado é aplicada.

A técnica de filtro casado consiste em demodular a informação transmitida pelos usuários primários utilizando um receptor compatível com a camada física dos usuários primários. Essa

técnica, que apresenta desempenho ótimo no que se refere à capacidade de detecção, não é utilizada largamente na prática porque requer que o rádio cognitivo seja capaz de demodular os sinais de todas as tecnologias que possam utilizar uma dada faixa de frequência. As Figuras 3.8 e 3.9 ilustram esquematicamente o algoritmo de um sistema de sensoriamento espectral pelo método do filtro casado.



Figura 3.8: Diagrama de blocos de um filtro casado. Adaptado de [28].

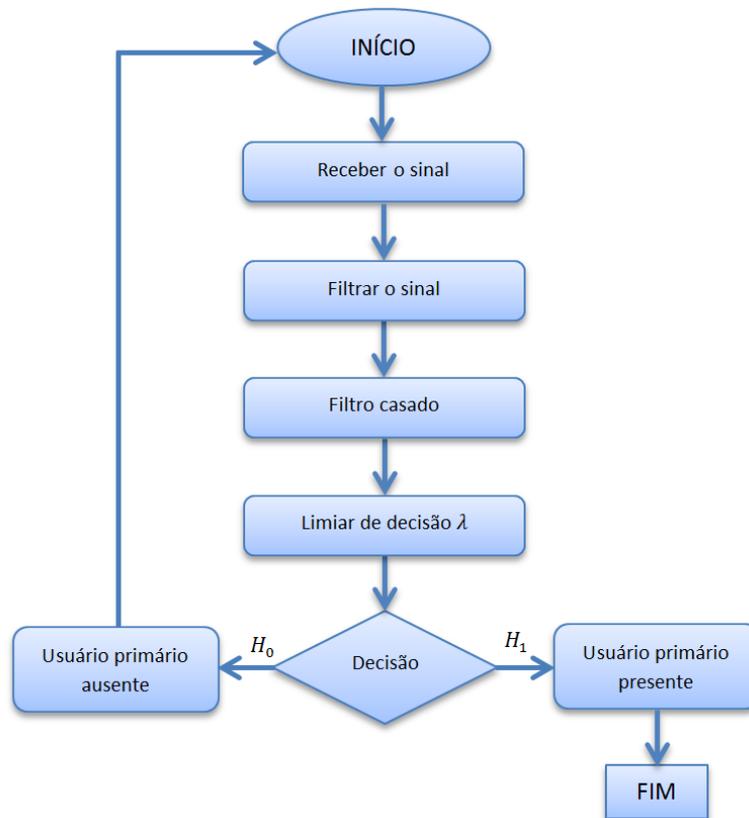


Figura 3.9: Fluxograma de um filtro casado. Adaptado de [28].

3.2.3 Requisitos de Sensoriamento de Espectro

O sensoriamento espectral é uma etapa crítica do ciclo de um sistema de rádio cognitivo. É fundamental que esta função atenda aos requisitos de qualidade e de confiabilidade, a fim de garantir que sistemas de rádios cognitivos sejam eficazes e não degradem a comunicação dos usuários licenciados. Desta forma, os algoritmos de sensoriamento espectral devem se pautar nas seguintes características:

- **Acurácia:** As técnicas de sensoriamento espectral devem ser capazes de identificar com precisão o estado do canal sensoriado. O sensoriamento deve identificar fidedignamente a situação do canal, ou seja, deve ter alta probabilidade de detecção, baixa probabilidade de alarme falso e baixa probabilidade de perda de detecção. Estas características atestam a confiabilidade do sistema.
- **Confiabilidade:** O sensoriamento espectral deve ser confiável, ou seja, deve se comportar de maneira previsível durante todo o tempo de atuação.
- **Rapidez:** A utilização do espectro eletromagnético é bastante variável, seja porque novas transmissões se iniciam a cada instante, seja pela própria natureza da propagação em meios não guiados. Neste contexto, os algoritmos de sensoriamento do espectro devem ser rápidos o bastante para permitirem que estas variações sejam percebidas pelo rádio cognitivo [31].
- **Robustez:** As técnicas de sensoriamento espectral devem ser capazes de reconhecer o sinal do sistema primário, mesmo mediante à incerteza do canal e à incerteza do ruído. A incerteza do canal se refere aos efeitos interferentes devidos ao desvanecimento nos canais de comunicação. Sistemas robustos devem saber distinguir se o canal está disponível ou se está ocupado por um sinal fortemente desvanecido. Por outro lado, a incerteza do ruído se refere ao conhecimento, por parte do sistema cognitivo, do valor da potência do ruído no sistema. Os sistemas cognitivos devem ser capazes de determinar a potência do ruído do canal adequadamente para que possam adaptar a sua potência de transmissão aos requisitos de RSR da rede.

3.3 Conclusões

Devido as questões de escassez espectral faz-se necessário o desenvolvimento de tecnologias que utilizem o espectro eletromagnético de maneira mais inteligente e eficiente. O rádio-cognitivo é um sistema de comunicação sem fio com proposta de aproveitar os recursos espectrais de forma inteligente e eficiente. Com base nestas questões, esta seção explora a perspectiva e as tendências tecnológicas dos sistemas de rádio cognitivo.

Observaram-se as características das redes operando em sistemas de rádio cognitivos em cenários de sensoriamento espectral. Os rádios cognitivos baseiam-se em ciclos operacionais que envolvem o sensoriamento espectral, a análise do espectro e a decisão espectral, todas estas etapas objetivam possibilitar o uso eficiente do espectro, aproveitando as oportunidades espectrais.

O sensoriamento espectral, foco deste trabalho, é uma das mais importantes funções do ciclo operacional dos rádios cognitivos e consiste da detecção, em tempo real, de sinais no canal de comunicação. As métricas dos sistemas de sensoriamento espectral foram também abordadas. Os modelos de sensoriamento espectral mais comuns atuam essencialmente sobre hipóteses de decisão binárias – canal ocupado ou canal ocioso. Foram apresentadas três tipos de esquema de detecção, mais especificamente, a detecção de energia, baseada na análise da energia presente no canal; a detecção mediante a avaliação das propriedades cicloestacionárias, baseada na análise da correlação dos sinais presentes no canal; e o método do filtro casado, que utiliza um filtro para avaliar as características do sinal presente no canal.

4 Sensoriamento de Espectro em Canais com Desvanecimento Composto

Os serviços de telecomunicações sem fio estão emergindo rapidamente e aumentando ainda mais a demanda por espectro eletromagnético, incluindo maiores largura de banda [32]. O espectro eletromagnético está predominantemente reservado para comunicações sem fio de alta velocidade, todavia a taxa de ocupação de seus canais é usualmente muito baixa na maior parte do tempo [33]. Assim, existem muitas bandas de frequência com uso reduzido ou nulo que poderiam permitir uma melhoria da capacidade e, conseqüentemente, da qualidade dos serviços em que estas frequências alocadas são insuficientes. Para que seja possível executar um acesso oportunista das frequências ociosas, o rádio cognitivo deve ser confiável e eficiente no processo de sensoriamento de espectro. Ao mesmo tempo, este dispositivo deve ser capaz de adaptar os seus parâmetros de transmissão e/ou de recepção para operar sob condições ótimas e de maneira a não causar interferência em outros dispositivos.

O sensoriamento de espectro em canais com desvanecimento foi estudado em [34–36], usando um esquema de detecção de energia. Nos referidos artigos, a probabilidade de alarme falso, a probabilidade de perda de detecção e a probabilidade de detecção foram obtidas para alguns modelos de desvanecimento de pequena escala tais como Rice, Nakagami- m e Rayleigh. Entretanto, estudos referentes a modelos compostos são ainda uma escassez na literatura. Os modelos compostos proporcionam caracterização estatística notavelmente precisas pois consideram tanto o desvanecimento em pequena escala quanto em grande escala em seu modelo físico. Além disso, questões relevantes como o impacto da incerteza do ruído na capacidade de detecção e o desempenho do sistema em situações em que a relação sinal-ruído é baixa são raramente encontradas.

Nesta dissertação, os modelos de canais de comunicação em desvanecimento composto Nakagami- m /Gamma [25] e κ - μ sombreado [14] são considerados a fim de investigar o desempenho da atividade de sensoriamento de espectro em ambientes de desvanecimento realista e preciso. Ambos modelos consideram os fenômenos de múltiplos percursos e de sombreamento entretanto, o modelo Nakagami- m /Gamma descreve as variações em pequena escala e as variações em grande escala do desvanecimento em condições sem linha de visada direta entre o

transmissor e o receptor enquanto que o modelo κ - μ sombreado retrata cenários com linha de visada direta. As características de ambas distribuições permitem uma grande flexibilidade nos tipos mais comuns de ambientes práticos. Admitindo o erro de estimação da potência do ruído e a incerteza do ruído, os piores casos da probabilidade de perda de detecção e da probabilidade de alarme falso são derivados para sistemas de sensoriamento de espectro não cooperativos e cooperativos. Finalizando, medidas de campo são utilizadas para investigar a utilidade na prática de ambos modelos de desvanecimento composto em cenários de sensoriamento de espectro cooperativo.

4.1 Sensoriamento de Espectro em Detectores de Energia

O rádio cognitivo executa sensoriamento de espectro para identificar as bandas de frequências disponíveis e o processo de decisão é responsável por selecionar uma destas bandas para uso oportunístico. O processo de decisão com duas hipóteses é dado por

$$\begin{aligned} H_0 : y(t) &= n(t) \\ H_1 : y(t) &= h x(t) + n(t), \end{aligned} \quad (4.1)$$

em que $y(t)$ é o sinal detectado pelo usuário secundário também denotado pela variável aleatória Y e $x(t)$ é o sinal transmitido pelo usuário primário. O ganho do canal é denotado por h e o ruído aditivo gaussiano branco por $n(t)$.

Em ambientes com desvanecimento, h varia e a probabilidade de detecção, ao se utilizar detectores de energia, pode ser obtida calculando a média da probabilidade de detecção condicional para uma dada relação sinal-ruído sobre a função densidade de probabilidade da RSR, $f_\Gamma(\cdot)$, como [35]

$$P_d = P\{Y > \lambda \mid H_1\} = \int_x Q_u \left[\sqrt{2\gamma}, \sqrt{\lambda} \right] f_\Gamma(x) dx, \quad (4.2)$$

em que λ é o limiar de comparação e $Y > \lambda$ indica a presença do sinal do usuário primário no canal, u é o produto tempo largura de banda e $Q_u[\cdot, \cdot]$ é a função Marcum-Q [37] reescrita como [38]

$$Q_u[a, b] = \exp\left(-\frac{a^2}{2}\right) \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} \left(\frac{a^2}{2}\right)^k \frac{\Gamma\left[k + u, \frac{b^2}{2}\right]}{\Gamma[k + u]}, \quad (4.3)$$

em que $\Gamma[\cdot, \cdot]$ é a função Gamma incompleta [18].

A perda de detecção ocorre quando um canal ocupado é detectado como ocioso e o alarme falso ocorre quando um canal ocioso é detectado como ocupado. A probabilidade de perda de detecção, P_m , pode ser obtida por meio da relação $P_m = 1 - P_d$ [29], em que P_d é obtido por meio da Equação (4.2). A probabilidade de alarme falso, P_f , é definida como [35]

$$P_f = P\{Y > \lambda \mid H_0\} = \frac{\Gamma\left[u, \frac{\lambda}{2}\right]}{\Gamma[u]}. \quad (4.4)$$

O desempenho do detector de energia para uma relação sinal-ruído média $\bar{\gamma}$ e um produto tempo largura de banda u , pode ser caracterizado pelas curvas ROC, que relacionam a probabilidade de perda de detecção com a probabilidade de alarme falso.

4.1.1 Análise em Canais Modelados pela Distribuição Nakagami- m /Gamma

As curvas da característica de operação do receptor em um canal modelado pela distribuição composta Nakagami- m /Gamma, partem da determinação da probabilidade de detecção a partir da Equação (4.2), em que $f_\Gamma(\cdot)$ é substituído pela Equação (2.11). Com isto, a probabilidade de perda de detecção é obtida por meio da relação $P_m = 1 - P_d$. A ROC é então calculada relacionando a probabilidade de perda de detecção com a probabilidade de alarme falso (Equação (4.4)) para vários valores de limiar de detecção (λ).

As Figuras 4.1 e 4.2 apresentam várias curvas ROC para diferentes cenários de desvanecimento composto modelados pela distribuição Nakagami- m /Gamma. O produto tempo largura de banda e a relação sinal-ruído média utilizados foram $u = 5$ e de $\bar{\gamma} = 10$ dB, respectivamente. A análise da Figura 4.1, permite verificar que aumentando a predominância dos *clusters* de multipercursos, ao aumentar o valor do parâmetro m , a probabilidade de detecção também aumenta para uma dada probabilidade de alarme falso, como esperado, visto que o desvanecimento é atenuado. É possível verificar que este parâmetro tem um impacto muito significativo na análise, pois em um cenário com um baixo valor de m , a probabilidade de detecção é baixa e a probabilidade de perda de detecção é alta.

A partir da análise da Figura 4.2, verifica-se que aumentando a severidade do sombreamento no canal de comunicação, ao diminuir o valor do parâmetro m_s , a probabilidade de detecção diminui para uma dada probabilidade de alarme falso, como esperado, visto que o desvanecimento degrada o enlace de comunicação. A condição mais favorável ao canal ocorre quando $m_s \rightarrow \infty$, ou seja, quando não há sombreamento.

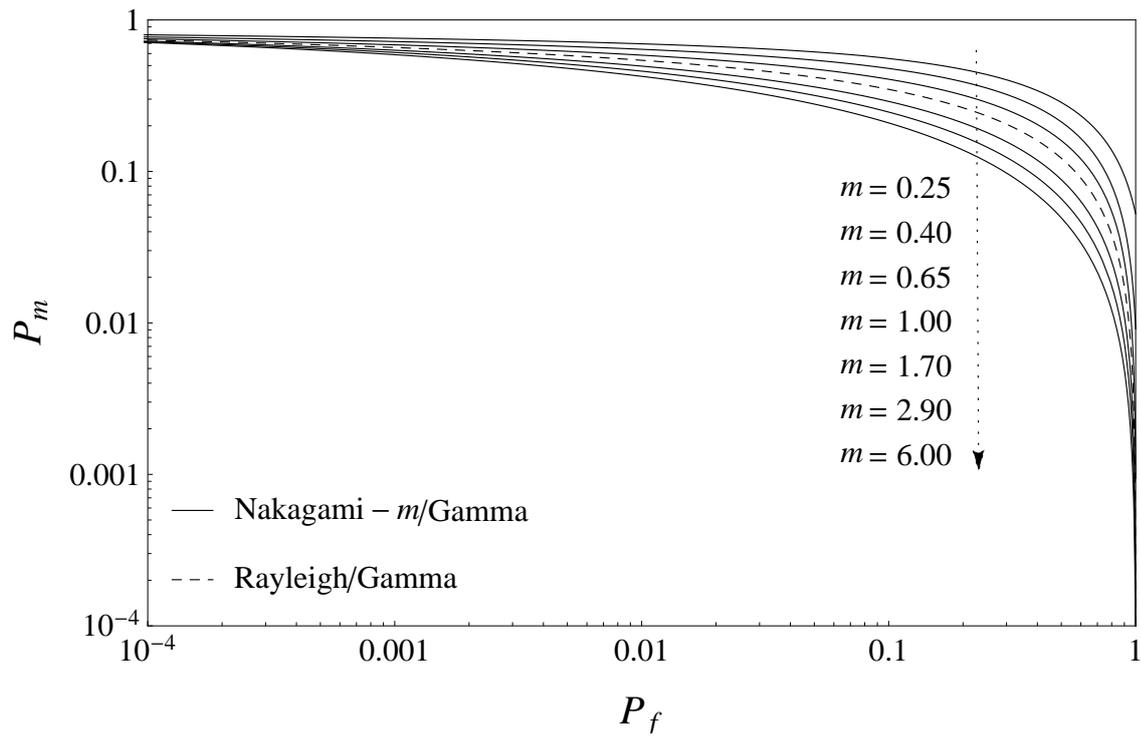


Figura 4.1: Característica de operação do receptor em canais com desvanecimento composto Nakagami- m/Γ ($m_s = 3$, $u = 5$ e $\bar{\gamma} = 10$ dB).

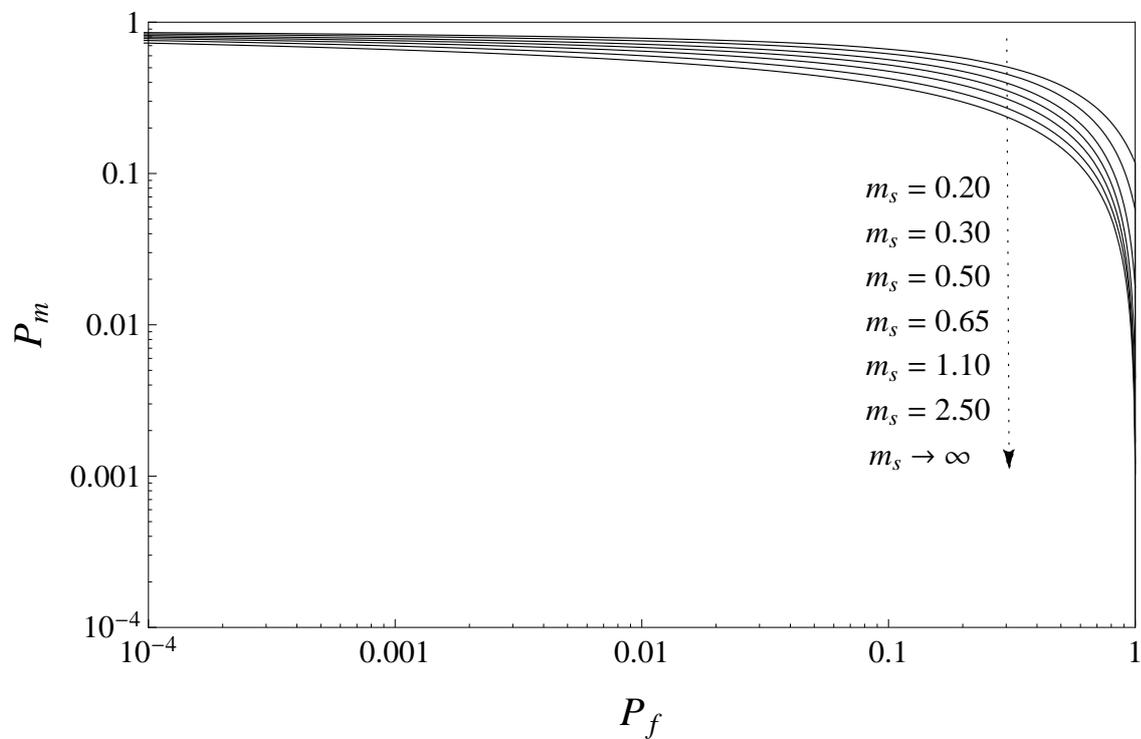


Figura 4.2: Característica de operação do receptor em canais com desvanecimento composto Nakagami- m/Γ ($m = 0.60$, $u = 5$ e $\bar{\gamma} = 10$ dB).

4.1.2 Análise em Canais Modelados pela Distribuição κ - μ Sombreado

As curvas da característica de operação do receptor em um canal modelado pela distribuição composta Nakagami- m /Gamma, partem da determinação da probabilidade de detecção a partir da Equação (4.2), em que $f_{\Gamma}(\cdot)$ é dado pela Equação (2.12). Com isto, a probabilidade de perda de detecção é obtida por meio da relação $P_m = 1 - P_d$. A ROC é então calculada relacionando a probabilidade de perda de detecção com a probabilidade de alarme falso (Equação (4.4)) para vários valores de limiar de detecção (λ).

A Figura 4.3 apresenta várias curvas ROC para diferentes cenários de desvanecimento composto modelados pela distribuição κ - μ sombreada. Os valores de u e de $\bar{\gamma}$ assumidos foram 5 e 10 dB, respectivamente, e o valor do parâmetro m_s é 3. A análise do gráfico permite verificar que aumentando a predominância dos *clusters* de multipercursos, ao aumentar o valor do parâmetro μ , a probabilidade de detecção também aumenta para uma dada probabilidade de alarme falso, como esperado, visto que o desvanecimento é atenuado. É possível ver que este parâmetro tem um impacto muito significativo na análise, pois em um cenário com um baixo valor de μ , a probabilidade de detecção é baixa e a probabilidade de perda de detecção é alta. Além disso, a Figura 4.3 ilustra o efeito das componentes dominantes do sinal, descrito pelo parâmetro de desvanecimento κ , na curva característica de operação do receptor. Note que, quando o parâmetro κ aumenta, ou seja, quando as componentes dominantes do sinal prevalecem, a probabilidade de detecção também aumenta, implicando em cenários de desvanecimento mais favoráveis.

Fixando $\kappa = 1.50$ e $\mu = 1.00$, a Figura 4.4 visa apresentar o comportamento do parâmetro m_s que modela o sombreado ao qual o canal de comunicação está sujeito. Observa-se claramente que a redução do sombreado — caracterizada pelo aumento do valor do parâmetro m_s — gera uma atenuação da probabilidade de perda de detecção, fato que pode beneficiar a detecção do sinal e resultar em um cenário possivelmente mais favorável.

A análise dos gráficos permite notar também que a distribuição κ - μ sombreada é capaz de retratar um número grande de cenários de operação de canais de comunicação, com probabilidade de perda de detecção alta e baixa para uma dada probabilidade de alarme falso, permitindo que o receptor sem fio opere com o valor mais favorável de probabilidade de detecção para diferentes ambientes.

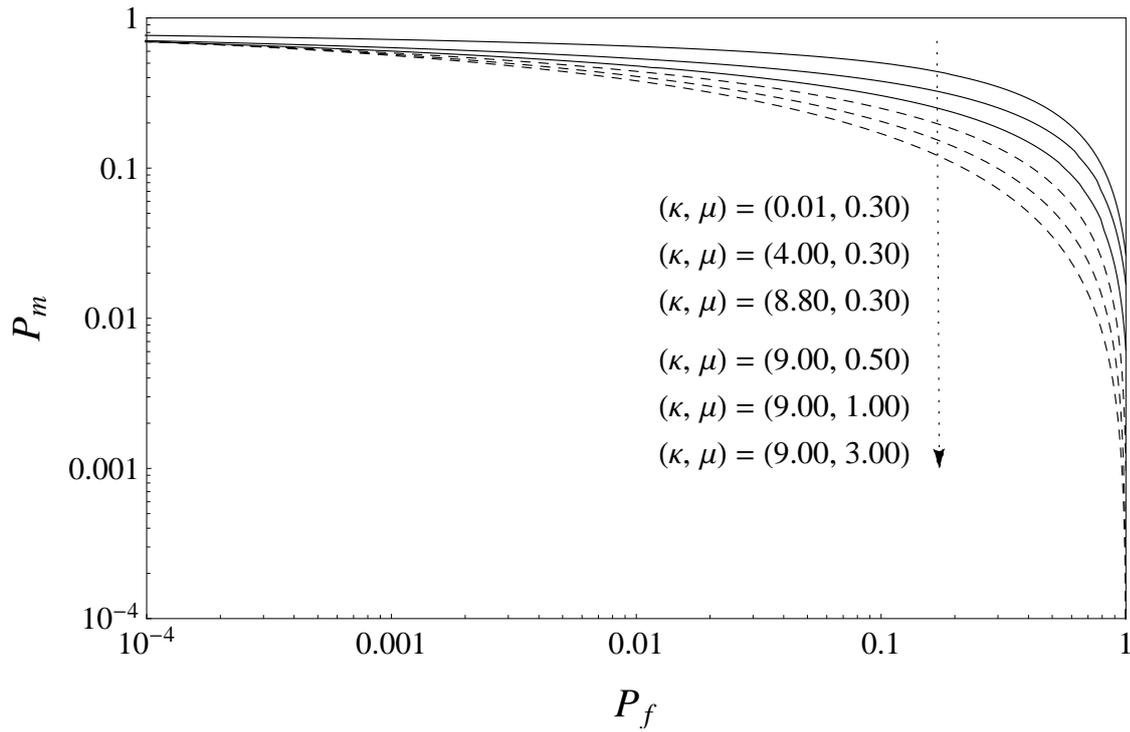


Figura 4.3: Característica de operação do receptor em canais com desvanecimento composto κ - μ sombreada ($m_s = 3$, $u = 5$ e $\bar{\gamma} = 10$ dB).

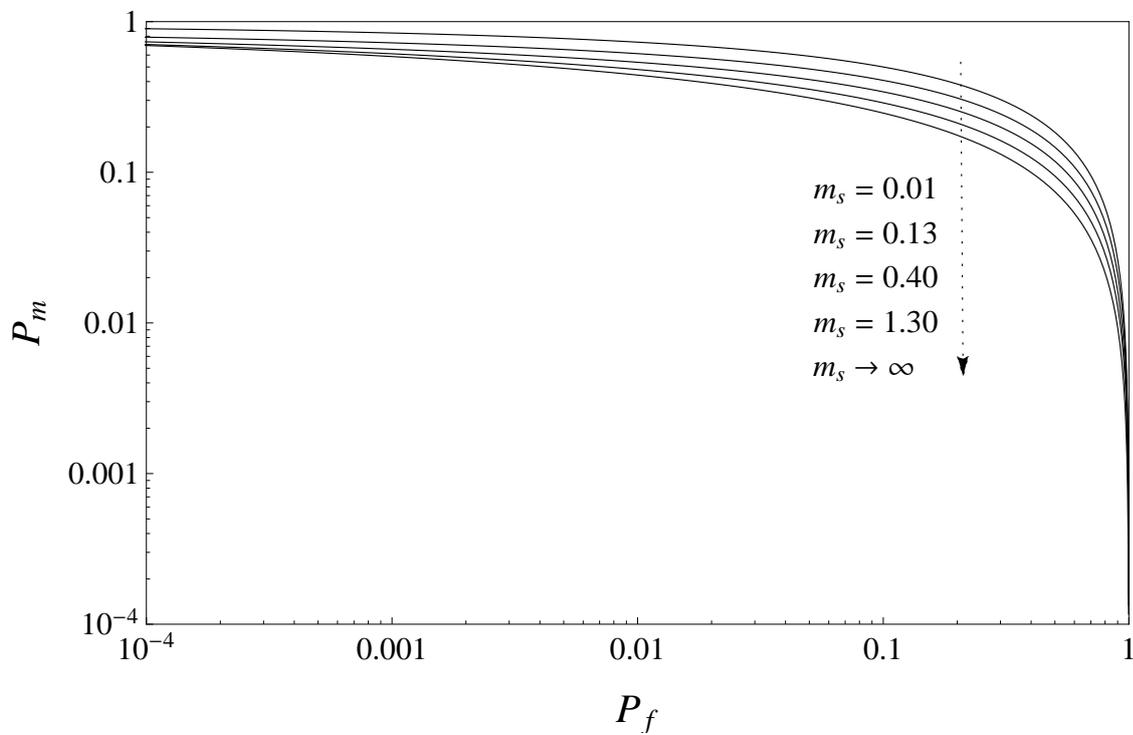


Figura 4.4: Característica de operação do receptor em canais com desvanecimento composto κ - μ sombreada ($\kappa = 1.5$, $\mu = 1$, $u = 5$ e $\bar{\gamma} = 10$ dB).

4.2 Sensoriamento de Espectro em Cenários Cooperativos Considerando a Incerteza do Ruído

Sensoriamento de espectro considerando a incerteza do ruído

Nos cenários em que há incerteza do ruído, não é possível detectar o usuário primário quando a relação sinal-ruído sensoriada está abaixo de certo limiar. Assumindo a presença de β dB de incerteza na estimação da potência do ruído, a potência estimada do ruído estará no intervalo $(\delta_S^2/\alpha, \alpha \delta_S^2)$, em que $\alpha = 10^{(\beta/10)}$ e δ_S^2 é a potência real do ruído. Quando a potência do ruído é sobre-estimada como $\bar{\delta}_S^2 = \alpha \delta_S^2$, a probabilidade de alarme falso pode ser obtida como [39]

$$\begin{aligned} P_f &= P \left\{ \frac{1}{\bar{\delta}_S^2} \sum_{i=1}^N x^2(i) > \bar{\lambda} | H_0 \right\} \\ &= P \left\{ \frac{z}{\bar{\delta}_S^2} > \alpha \bar{\lambda} | H_0 \right\} \\ &= P_f(\alpha \bar{\lambda}), \end{aligned} \quad (4.5)$$

em que $z = \sum_{i=1}^N x^2(i)$ é a potência do sinal recebido considerando N amostras. Considerando que a potência estimada do ruído pode assumir qualquer valor no intervalo $(\delta_S^2/\alpha, \alpha \delta_S^2)$ para garantir as restrições da utilização do espectro, um limiar apropriado deve ser selecionado como $\bar{\lambda} = \alpha \lambda$. Portanto, o pior caso de P_d ocorre quando $\bar{\delta}_S^2 = \alpha \delta_S^2$ e

$$\begin{aligned} P_{d,worst} &= P \left\{ \frac{z}{\bar{\delta}_S^2} > \bar{\lambda} | H_1 \right\} \\ &= \int_x Q_u \left[\sqrt{2\gamma}, \alpha \sqrt{\lambda} \right] f_\Gamma(x) dx. \end{aligned} \quad (4.6)$$

Com base nas equações (3.3) e (4.6), a probabilidade de perda de detecção é facilmente derivado como

$$\begin{aligned} P_m &= 1 - P_{d,worst} \\ &= 1 - \int_x Q_u \left[\sqrt{2\gamma}, \alpha \sqrt{\lambda} \right] f_\Gamma(x) dx. \end{aligned} \quad (4.7)$$

Sensoriamento de Espectro com Esquema Cooperativo

O sensoriamento de espectro cooperativo tem sido apresentado como um método efetivo de otimização do desempenho da detecção ao explorar a diversidade espacial [30]. Mais especificamente, o sensoriamento cooperativo tem como objetivo melhorar o desempenho de detecção através da implementação da diversidade espacial ao observar a localização espacial dos usuá-

rios com rádios cognitivos. Assim, os usuários podem compartilhar suas informações de sensoriamento para a tomada de uma decisão combinada mais precisa do que as decisões individuais.

Neste contexto, considera-se agora uma rede secundária composta com a colaboração de n usuários, em que todos estão sensoriando toda a banda de frequência desejada sob um regime periódico. Por simplicidade, assume-se que todos os n usuários estão submetidos a desvanecimento independente e identicamente distribuído (iid) com a mesma relação sinal-ruído média. Assume-se ainda que todos os usuários empregam a técnica de detecção de energia com a mesma regra de decisão, isto é, possuem o mesmo limiar de detecção λ .

No cenário descrito, um usuário secundário recebe as decisões de $n - 1$ outros terminais e decide por H_1 se pelo menos uma das decisões individuais recebidas for H_1 . Esta regra substanciada é conhecida como regra OU (OR-rule) [40]. Assim, para o esquema colaborativo especificado, a probabilidade de detecção, denotada por Q_d , pode ser escrita como

$$Q_d = 1 - (1 - P_d)^n. \quad (4.8)$$

Similarmente, a probabilidade de alarme falso, denotada por Q_f , é

$$Q_f = 1 - (1 - P_f)^n. \quad (4.9)$$

A probabilidade de perda de detecção para o esquema colaborativo, Q_m , pode ser obtida por meio da Equação (4.8), utilizando a relação

$$Q_m = 1 - Q_d. \quad (4.10)$$

4.2.1 Sensoriamento Cooperativo em Canais de Desvanecimento Composto Nakagami- m /Gamma

Considerando a incerteza do ruído na modelagem do sistema de comunicação, o pior caso da probabilidade de detecção é derivado para o canal com desvanecimento Nakagami- m /Gamma ao substituir (2.11) na Equação (4.6). A fim de avaliar o desempenho do esquema de sensoriamento espectral colaborativo, a Figura 4.5 revela a característica de detecção para diferentes números de usuários colaboradores em um cenário típico de um canal comunicação desvanecimento composto modelado pela distribuição Nakagami- m /Gamma em que $m = 2.00$.

Neste cenário, os parâmetros produto tempo largura de banda e a relação sinal-ruído média são mantidos fixos em $u = 5$ e $\bar{\gamma} = 10$ dB, respectivamente. Conforme o esperado, o

sensoriamento de espectro cooperativo pode aprimorar a característica de detecção ao reduzir a probabilidade de perda de detecção do sistema como um todo. Mesmo com um número pequeno de terminais colaborando na rede, há um ganho consideravelmente relevante na probabilidade de detecção. Números elevados de terminais colaboradores podem ser encontrados na prática, por exemplo, em redes de sensores sem fio. A Figura 4.5 permite avaliar também o efeito do sombreamento no canal de comunicação. Há um ganho significativo de desempenho quando a condição de desvanecimento de larga escala é suave ($m_s = 5.00$) em detrimento da condição de desvanecimento severo ($m_s = 0.50$).

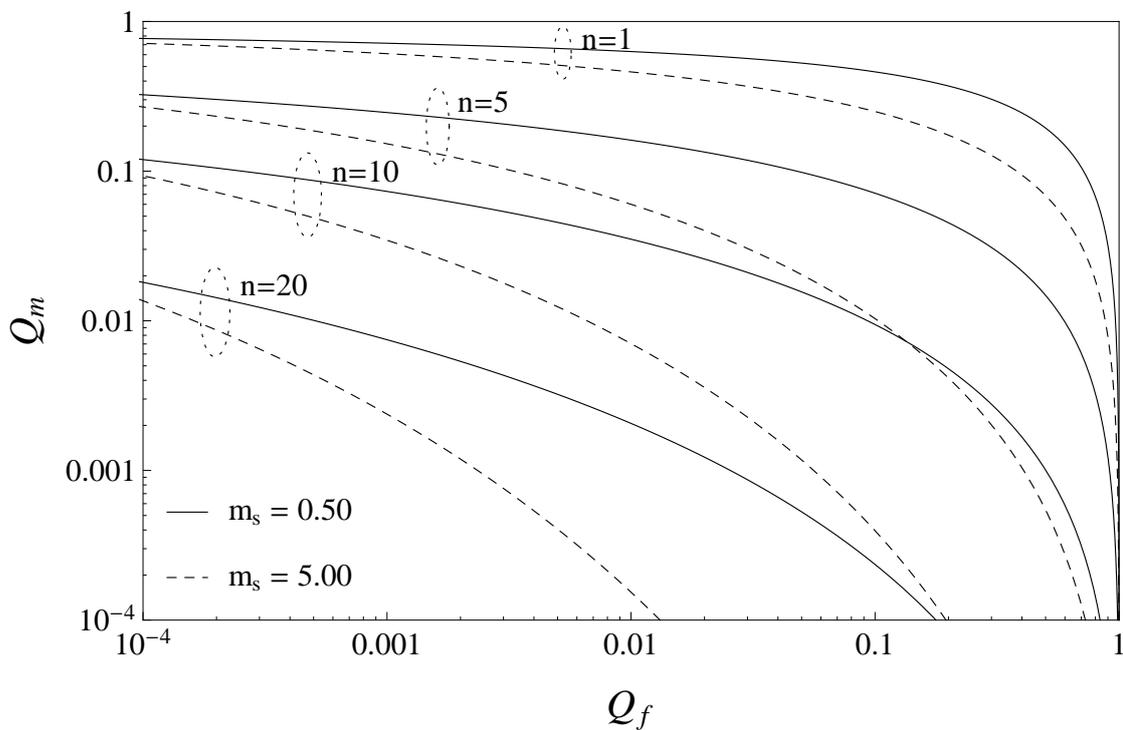


Figura 4.5: Característica de operação do receptor em canais com desvanecimento Nakagami- m /Gamma com esquema cooperativo ($m = 2$, $u = 5$, $\bar{\gamma} = 10$ dB e $\beta = 0$ dB).

Os gráficos nas Figuras 4.6 e 4.7 apresentam a probabilidade de detecção em função da relação sinal-ruído média para diferentes esquemas de cooperação, variando também o cenário de sombreamento selecionando $m_s = 0.5$ para a condição de sombreamento severo e $m_s = 5$ para sombreamento mais ameno. Em cada curva, o limiar de decisão (λ) foi escolhido tal que $Q_f = 10^{-1}$ e o parâmetro produto tempo largura de banda é mantido fixo em $u = 5$. A incerteza na potência do ruído é considerada em ambas as figuras e é possível observar que esta condição promove a queda da probabilidade de detecção, como era esperado.

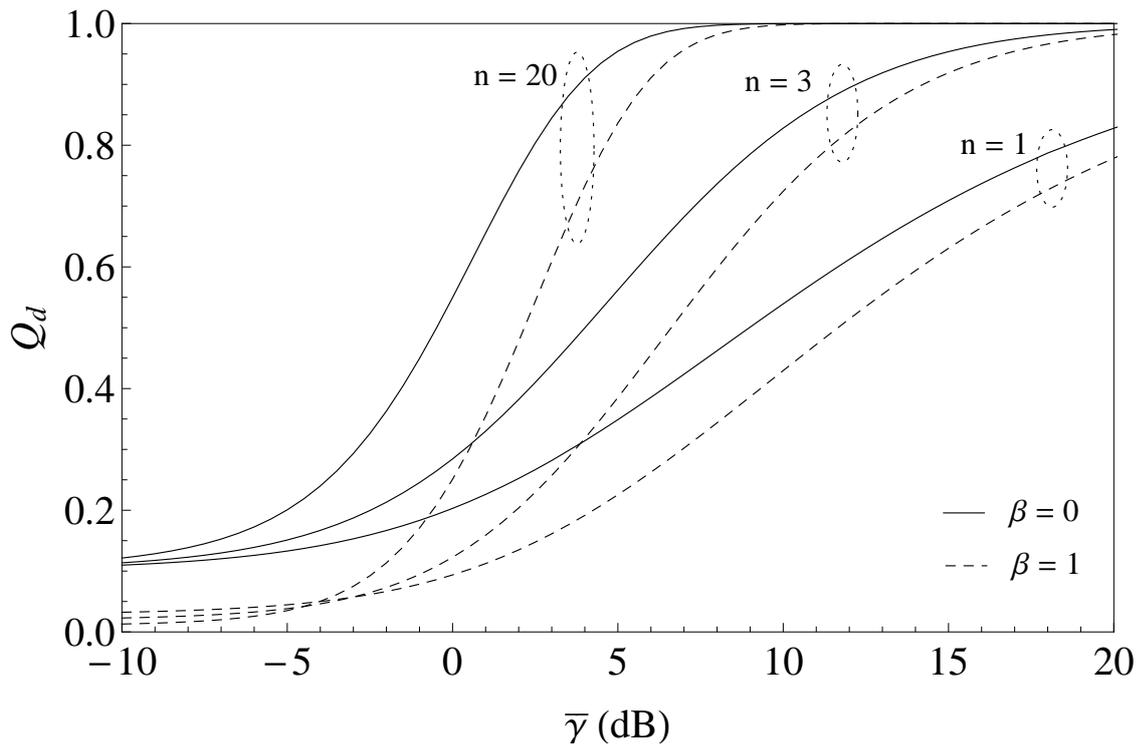


Figura 4.6: Probabilidade de detecção em canais Nakagami- m /Gamma com esquema cooperativo sob sombreamento severo ($m = 2$, $m_s = 0.5$, $Q_f = 10^{-1}$ e $u = 5$).

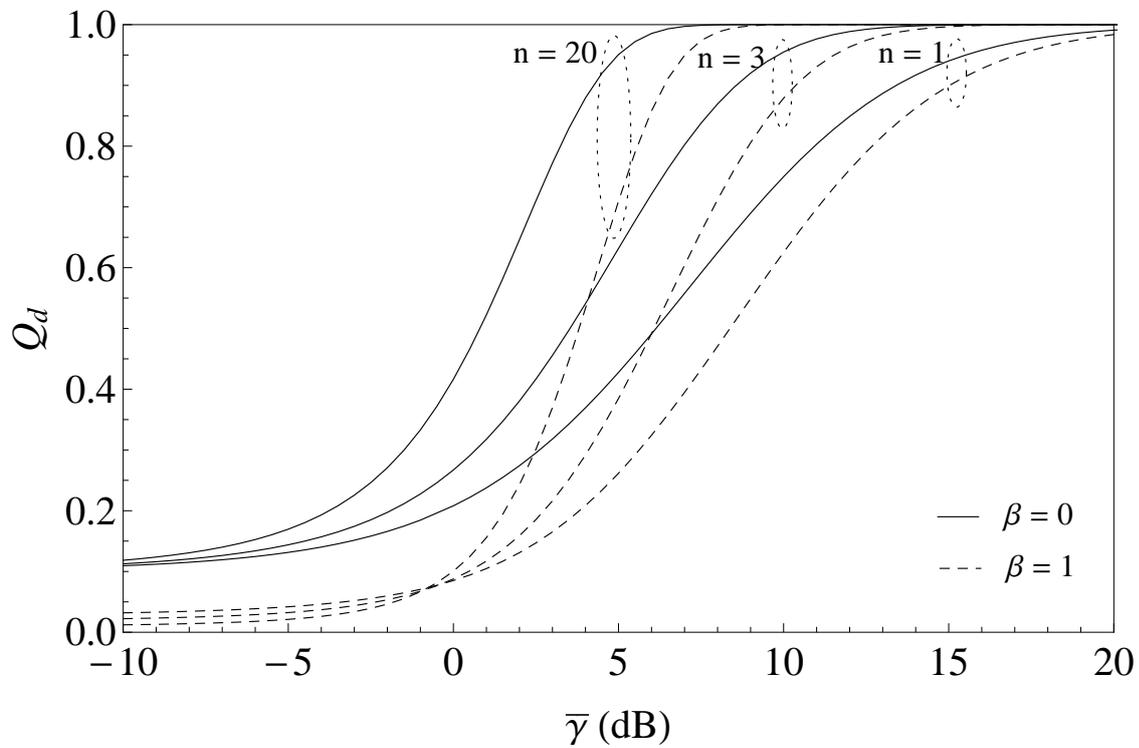


Figura 4.7: Probabilidade de detecção em canais Nakagami- m /Gamma com esquema cooperativo sob sombreamento suave ($m = 2$, $m_s = 5.0$, $Q_f = 10^{-1}$ e $u = 5$).

Na Figura 4.7, para um número pequeno de usuários cooperativos em um cenário de sombreamento mais favorável, a relação sinal-ruído requerida para se obter um valor desejável de probabilidade de detecção é muito menor que no caso de sombreamento acentuado, resultado que está conforme a teoria. Este efeito pode ser contornado se o número de terminais cooperativos for aumentado, confirmando a grande importância da cooperação entre usuários para que se alcance um sensoriamento de espectro mais confiável e, conseqüentemente, um desempenho superior para o rádio cognitivo.

4.2.2 Sensoriamento Cooperativo em Canais de Desvanecimento Composto κ - μ Sombreado

Considerando a incerteza do ruído na modelagem do sistema de comunicação, o pior caso da probabilidade de detecção é derivado para o canal com desvanecimento κ - μ sombreado ao substituir (2.12) na Equação (4.6). Após algumas manipulações algébricas [41], o pior caso da probabilidade de detecção é obtido de forma exata como

$$P_{d,worst} = \frac{\mu^\mu m_s^{m_s} (1 + \kappa)^\mu}{\Gamma(\mu) \bar{\gamma}^\mu (\kappa \mu + m_s)^{m_s}} \sum_{l=0}^{\infty} \frac{\Gamma(l + u, (\alpha^2 \lambda / 2))}{\Gamma(l + 1) \Gamma(l + u)} \left(\frac{\kappa(1 + \kappa) \mu^2}{\bar{\gamma}(\kappa \mu + m)} \right)^{-(l + \mu)} \times H_{2,2}^{2,1} \left[\begin{matrix} (\bar{\gamma} + \mu + \kappa \mu)(\kappa \mu + m) \\ \kappa(1 + \kappa) \mu^2 \end{matrix} \middle| \begin{matrix} (1 - l - \mu, 1), (-l, 1) \\ (0, 1), (m - l - \mu, 1) \end{matrix} \right], \quad (4.11)$$

em que $H_{p,q}^{m,n}$ é a função H de Fox [42].

Utilizando (2.12) na Equação (4.7) e por meio da Equação (4.11) é possível avaliar as condições de sensoriamento de espectro em canais de desvanecimento κ - μ sombreado.

Com a finalidade de avaliar o desempenho do esquema de sensoriamento espectral colaborativo, a Figura 4.8 revela a característica de detecção para diferentes números de usuários colaboradores em um cenário típico de um canal comunicação em linha de visada com desvanecimento modelado pela distribuição κ - μ em que $\kappa = 1.50$ and $\mu = 1.00$. Neste cenário, os parâmetros $u = 5$ e $\bar{\gamma} = 10$ dB são mantidos fixos.

Conforme o esperado, o sensoriamento de espectro cooperativo pode aprimorar a característica de detecção ao reduzir a probabilidade de perda de detecção do sistema como um todo.

Mesmo com um número pequeno de terminais colaborando na rede, há um ganho consideravelmente relevante na probabilidade de detecção. Números elevados de terminais colaboradores podem ser encontrados na prática, por exemplo, em redes de sensores sem fio.

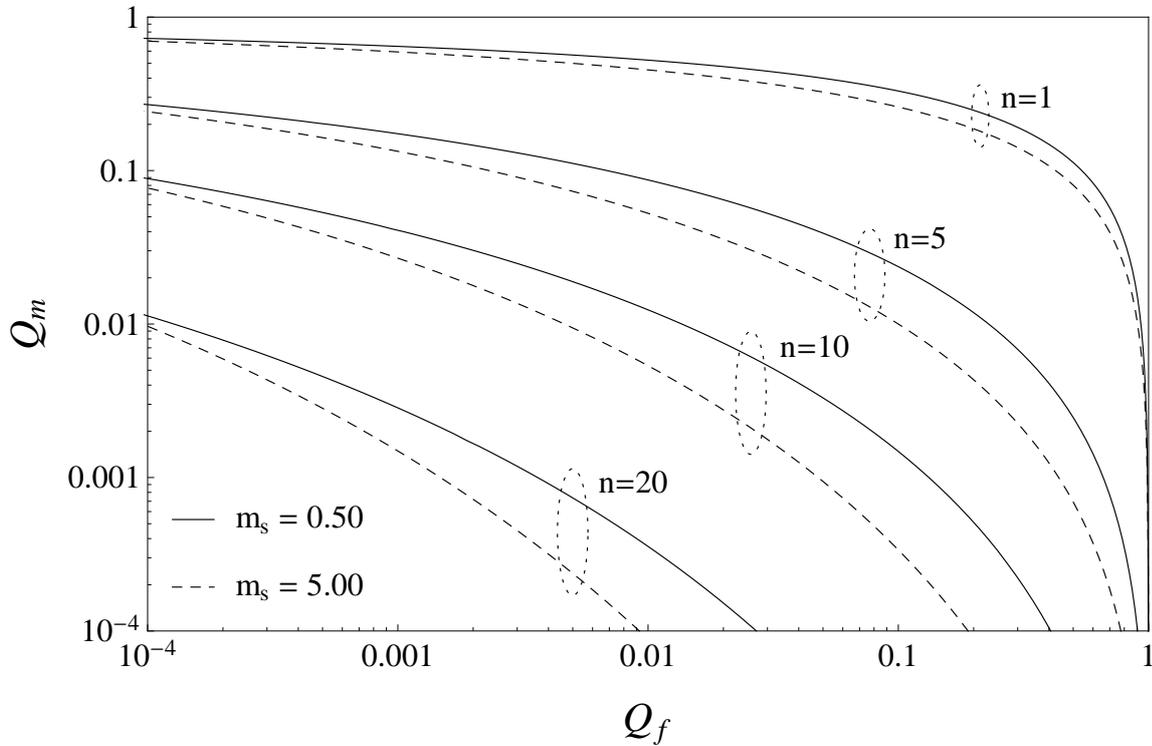


Figura 4.8: Característica de operação do receptor em canais com desvanecimento κ - μ sombreado com esquema cooperativo ($\kappa = 1.5$, $\mu = 1$, $u = 5$, $\bar{\gamma} = 10$ dB e $\beta = 0$ dB).

As Figuras 4.9 e 4.10 apresentam a probabilidade de detecção em função da relação sinal-ruído média para vários esquemas de cooperação em um canal de comunicação com desvanecimento modelado pela distribuição κ - μ sombreada. Os cenários extremamente sombreado ($m_s = 0.5$), na Figura 4.9, e levemente sombreado ($m_s = 5$), na Figura 4.10, podem ser comparados. Para cada curva, o limiar de decisão, λ , foi escolhido de maneira que $Q_f = 10^{-1}$ e o produto tempo-largura de banda, u , é fixado em 5. A incerteza do ruído é considerada em ambas as figuras e é possível observar que esta condição resulta na diminuição da probabilidade de detecção, como esperado. Ao comparar a Figura 4.9 e a Figura 4.10, para um mesmo número de usuários colaboradores, a relação sinal-ruído necessária para se obter um nível desejável de probabilidade de detecção é consideravelmente inferior em um cenário em que o desvanecimento é fraco em comparação com o cenário em que o desvanecimento é mais forte, como esperado.

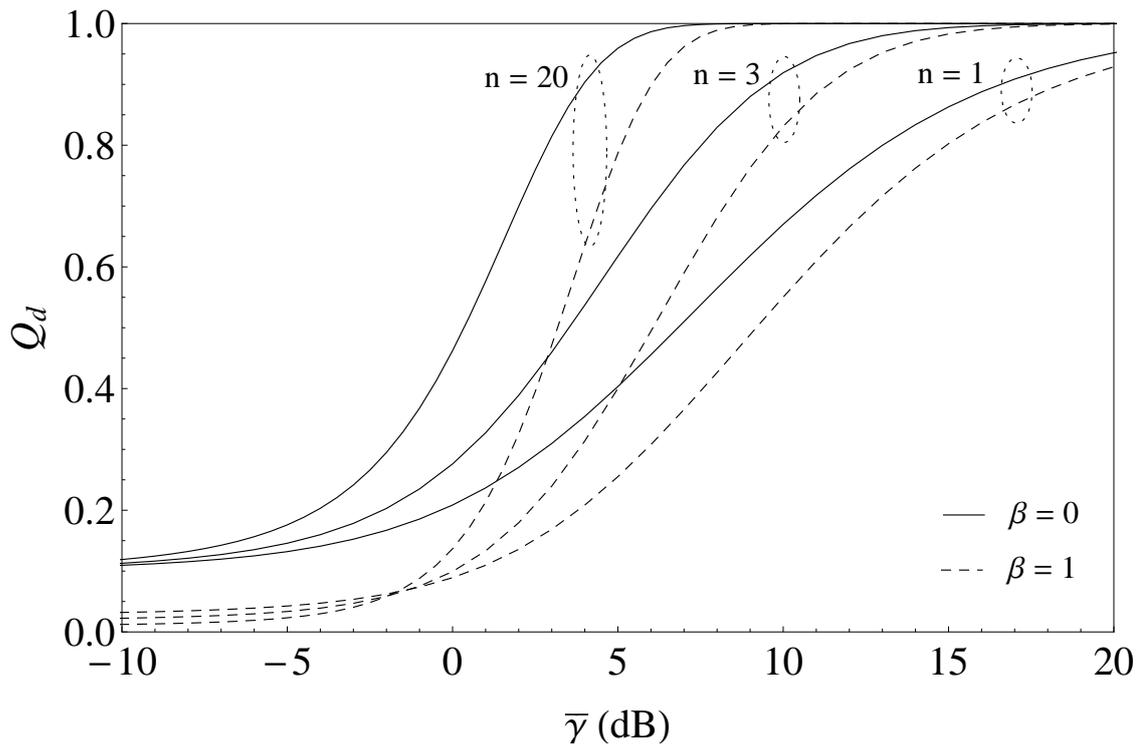


Figura 4.9: Probabilidade de detecção em canais κ - μ sombreado com esquema cooperativo sob sombreamento severo ($\kappa = 1.5$, $\mu = 1$, $m_s = 0.5$, $Q_f = 10^{-1}$ e $u = 5$).

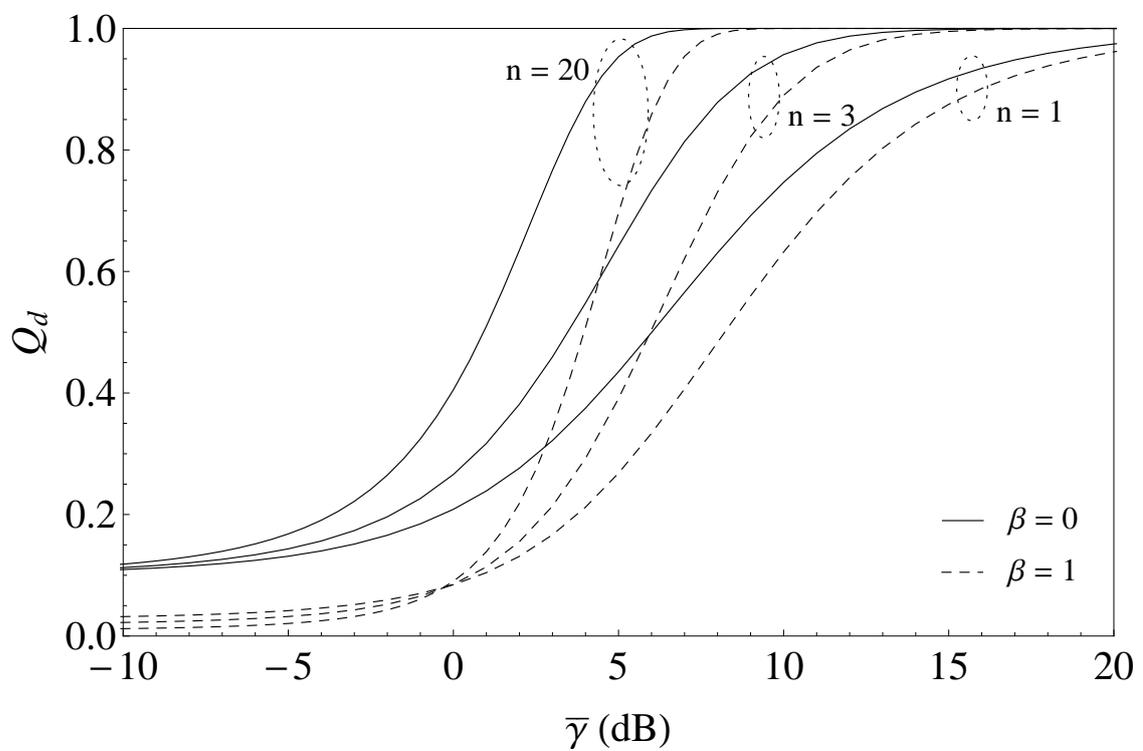


Figura 4.10: Probabilidade de detecção em canais κ - μ sombreado com esquema cooperativo sob sombreamento suave ($\kappa = 1.5$, $\mu = 1$, $m_s = 5$, $Q_f = 10^{-1}$ e $u = 5$).

O efeito do sombreamento pode ser suprimido com o aumento do número de terminais cooperativos, confirmando a grande importância da cooperação entre os usuários para se alcançar um nível melhor de desempenho da técnica de sensoriamento espectral. O sensoriamento de espectro cooperativo provê a detecção mais acurada do sinal e uma confiança maior por parte de todo o sistema.

4.2.3 Investigação Experimental

As Figuras 4.11 e 4.12 permitem que se faça a avaliação de desempenho do sensoriamento de espectro cooperativo em confronto com medidas de campo de sinais primários do *Digital Cellular System* (DCS 1800) [40]. A plataforma de medição foi instalada no telhado de uma edificação urbana na cidade de Barcelona, sendo composta por vários transmissores localizados a algumas dezenas até centenas de metros de distância da antena transmissora na presença de vários prédios refletindo e difratando os sinais de rádio.

4.2.3.1 Canais de Desvanecimento Composto Nakagami- m

A fim de investigar a utilidade do modelo de desvanecimento composto Nakagami- m /Gamma nas técnicas de sensoriamento de espectro, os parâmetros m e m_s foram selecionados de forma a prover o melhor ajuste da curva teórica aos dados práticos obtidos com os sinais primários do DCS 1800 e para provar a boa adequação do modelo Nakagami- m /Gamma na modelagem de cenários em que há desvanecimento do sinal de rádio.

Na Figura 4.11, o esquema cooperativo simulado é composto por 18 terminais, $n = 18$, o produto tempo largura de banda é $u = 2$ e o parâmetro de sombreamento das distribuições Rayleigh/Gamma e Nakagami- m /Gamma vale $m_s = 0.5$. Verifica-se que ambos modelos apresentam um ajuste melhor na condição que não considera a incerteza do ruído ($\beta = 0$) e que em ambos cenários de incerteza do ruído, o modelo composto Nakagami- m /Gamma possui um ajuste um pouco melhor que o modelo Rayleigh/Gamma, fato que pode ser explicado pela maior flexibilidade da distribuição Nakagami- m /Gamma em função de seu parâmetro de formatação m .

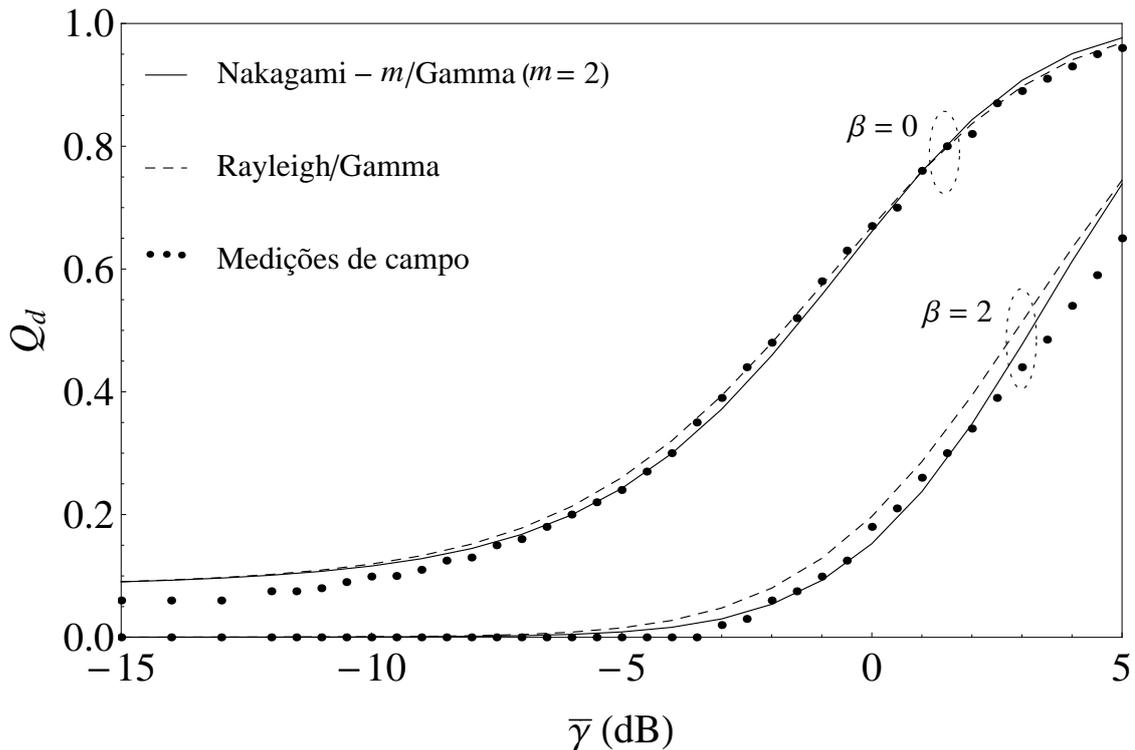


Figura 4.11: Comparação da probabilidade de detecção para os modelos compostos Nakagami- m /Gamma e Rayleigh/Gamma com dados experimentais do DCS 1800 ($m_s = 0.50$, $n = 18$ e $u = 2$).

4.2.3.2 Canais de Desvanecimento Composto κ - μ sombreado

Para investigar a utilidade e a adequação da distribuição κ - μ sombreada na modelagem de canal em meio às técnicas de sensoriamento de espectro, os parâmetros κ , μ e m_s foram selecionados de modo a proverem o melhor ajuste das curvas teóricas aos dados experimentais do DCS 1800 e para provar a adequação da distribuição κ - μ sombreada na modelagem de cenários com desvanecimento.

Na Figura 4.12, o esquema cooperativo simulado é composto por 18 terminais, $n = 18$, o produto tempo largura de banda é $u = 2$ e o parâmetro de sombreado das distribuições κ - μ sombreada e Rice sombreada vale $m_s = 0.5$. Verifica-se que a distribuição κ - μ sombreada possui um ajuste excelente em ambas as condições de incerteza do ruído enquanto que a distribuição Rice sombreada não se ajusta bem ao cenário que considera a incerteza do ruído ($\beta = 2$).

De modo geral, a distribuição κ - μ sombreada se ajusta melhor aos dados de campo do que a distribuição de Rice sombreada, uma vez que a distribuição κ - μ sombreada é um modelo mais

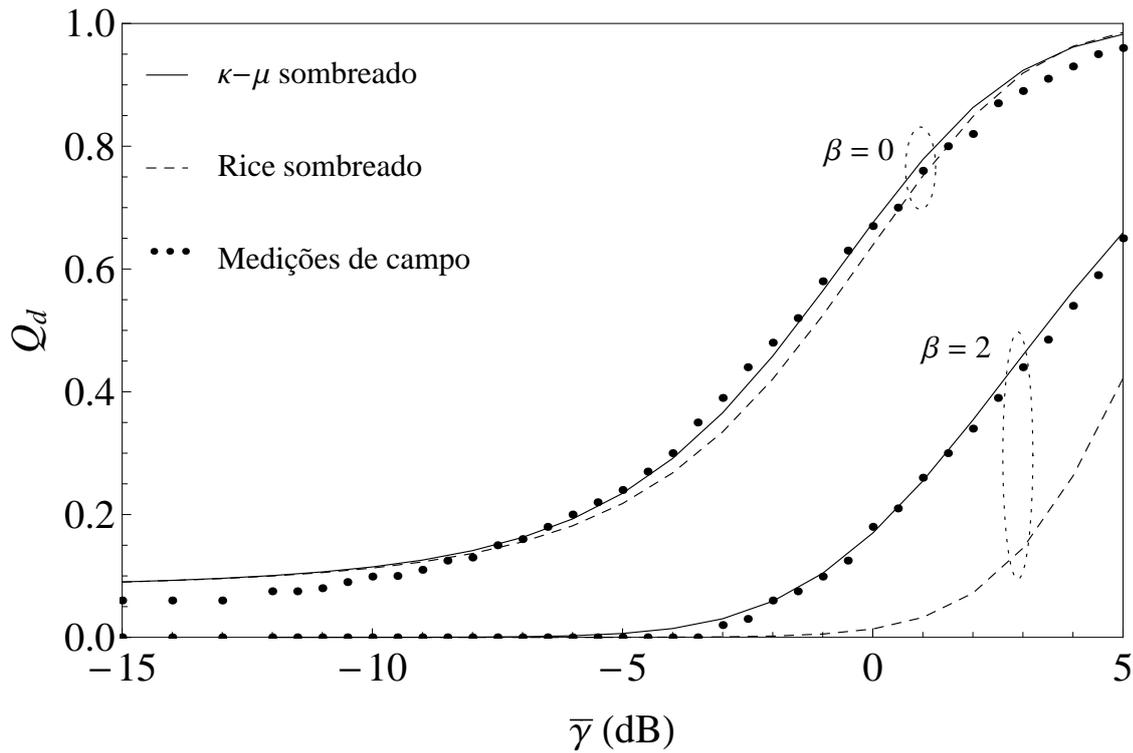


Figura 4.12: Comparação da probabilidade de detecção para os modelos compostos κ - μ sombreado e Rice sombreado com dados experimentais do DCS 1800 ($m_s = 0.50$, $n = 18$ e $u = 2$).

generalista de multipercursos e sombreado para cenários de propagação em linha de visada, controlado por três parâmetros de ajuste: κ , μ e m_s . Distribuições generalizadas tendem a modelar os canais de telecomunicações analisados de forma melhor, pois elas são mais flexíveis e portanto, incluem uma gama maior de cenários de comunicação.

4.3 Conclusões

Este capítulo trata da avaliação das probabilidades de detecção de oportunidade em sistemas com sensoriamento de espectro submetidos a desvanecimentos compostos, mais especificamente aos desvanecimentos Nakagami- m /Gamma e κ - μ /sombreado. Foram abordadas as métricas probabilísticas inerentes à análise dos sistemas de rádio cognitivos em cenário de sensoriamento espectral. Pôde-se verificar como o desvanecimento de pequena escala e o desvanecimento de larga escala interferem na probabilidade de detecção, na probabilidade de alarme falso e na probabilidade de perda de detecção.

Para sistemas de sensoriamento espectral submetidos ao desvanecimento composto Nakagami-

m/Γ foram avaliadas as curvas ROC alterando os parâmetros de desvanecimento de larga e de pequena escala, além dos cenários com sensoriamento espectral colaborativo, ilustrando como o desvanecimento interfere neste tipo de sistema. Nos sistemas de sensoriamento espectral submetidos ao desvanecimento composto $\kappa-\mu$ sombreado foram também ilustrados os resultados avaliativos referentes às curvas ROC e às curvas do comportamento de sistemas de sensoriamento colaborativo. Por fim, pôde-se comparar dados de campo com os modelos compostos, a fim de se comprovar a utilidade dos modelos analisados.

A partir dos resultados obtidos, pôde-se observar que a degradação das condições do canal desfavorecem cenários de sensoriamento espectral e podem propiciar erros de decisão espectral. Além desta observação, vale ressaltar que a utilização de sistemas colaborativos aprimoram o comportamento do sistema.

5 Investigação Experimental da Distribuição

Composta α - μ / α - μ

Em sistemas de comunicações sem fio, o desempenho das transmissões é severamente penalizado devido a natureza estocástica do canal de rádio, ambas as variações em pequena e em larga escala do desvanecimento afetam o sistema. No caminho entre o transmissor e o receptor, além da perda de propagação, o sinal de rádio móvel pode ser bloqueado por obstruções físicas - sombreamento - e sofrer múltiplas reflexões, espalhamento e difração - desvanecimento por multipercursos [43]. Neste contexto, um modelo de desvanecimento composto, isto é, um modelo que descreve concomitantemente os efeitos do desvanecimento de pequena escala e do desvanecimento de larga escala, retrata com maior fidelidade o comportamento do sinal e, por conseguinte, é considerado de grande importância [22].

Distribuições de desvanecimento compostas têm sido sugeridas na literatura técnica para modelar este fenômeno composto [44, 45]. O modelo composto mais comum utilizado na literatura é o modelo Rayleigh-Lognormal, também chamado de modelo Suzuki, composto pelo desvanecimento de pequena escala modelado por Rayleigh e pelo sombreamento modelado pela distribuição log-normal. Esta distribuição composta que modela o desvanecimento de larga escala por um processo log-normal é notória por possuir um tratamento analítico complexo. Como uma alternativa a substituir a distribuição log-normal na representação do fenômeno do sombreamento, propõe-se a utilização da distribuição Gamma que produz boa adaptação a dados experimentais e pode resultar em expressões de forma fechada para modelos compostos [24]. A distribuição Gamma permitiu a realização de diversas pesquisas, incluindo a obtenção dos modelos de desvanecimento composto Nakagami- m /Gamma e Rayleigh/Gamma, ambos em fórmulas fechadas e confrontados com medições experimentais [46].

O modelo de desvanecimento α - μ [10] foi proposto para prover uma análise mais realista do sinal propagante. Ele é um modelo de desvanecimento físico geral que considera um sinal composto por *clusters* de ondas de multipercursos propagando em um ambiente não-homogêneo. Ele é descrito por dois parâmetros físicos de desvanecimento, nomeadamente, α e μ , dos quais α representa a não linearidade do meio de propagação e μ representa o número de *clusters* de multipercursos [22]. Em vários cenários de propagação, foram efetuadas comparações do mo-

delo com medições de campo e é possível observar que, em muitas situações, o modelo α - μ possui um ajuste melhor às variações estatísticas do sinal de rádio [15, 21]. A distribuição α - μ foi aplicada por [47] para modelar concomitantemente o desvanecimento de pequena escala e o sombreamento, o que levou a resultados bastante satisfatórios [26]. Neste sentido, o modelo composto α - μ/α - μ [22] disponibiliza uma ferramenta pujante e flexível que pode ser empregada para modelar canais de comunicação sem fio de maneira notavelmente acurada.

Trabalhos que relatem investigações e comprovações práticas do modelo α - μ/α - μ não são conhecidos na literatura. Para preencher esta lacuna, este capítulo investiga e valida experimentalmente a distribuição composta α - μ/α - μ . A investigação experimental pauta-se na comparação comportamental da distribuição em análise ante medidas de campo realizadas em diversos tipos de ambientes. As características investigadas compreendem as estatísticas de primeira ordem do modelo de canal α - μ/α - μ . As curvas teóricas são confrontadas com os dados experimentais e excelentes ajustes são encontrados.

Esta investigação abordada proporciona que a análise de modelos de desvanecimento composto seja impulsionada. A distribuição α - μ/α - μ é um modelo de canal com desvanecimento composto obtido recentemente e ainda pouco explorado. Devido a sua complexidade e a sua maior demanda de conceitos, o tratamento e a utilização deste modelo necessita de estudos mais detalhados e de um maior processo de experimentação e análise, para que seja possível desenvolver o estudo de redes de telecomunicações futuras, como os sistemas de rádio cognitivo. Devido a este requisito de evolução exploratória, este trabalho gera base informativa necessária para que a análise de sensoriamento espectral seja possível em canais modelados por distribuições mais realísticas como a distribuição α - μ/α - μ .

5.1 Testes de Campo

Uma série extensa de campanhas de medição de campo – com a coleta de dados de um sistema de comunicação sem fio – foi realizada na Universidade de Brasília (UnB) e na Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), com a finalidade de analisar e validar as estatísticas de primeira ordem da distribuição composta α - μ/α - μ .

5.1.1 Sistema de Medição

O sistema de medição é composto por um subsistema de transmissão e um subsistema de recepção, que promove a recepção, o condicionamento e o processamento do sinal, conforme ilustrado na Figura 5.1. No subsistema de transmissão, uma antena transmissora é fixada no topo de um prédio, tanto na UNICAMP quanto na UnB, conforme ilustrado nas Figuras 5.2 e 5.3. A transmissão de dados consistiu-se de um tom de onda contínua em 2500 MHz e, posteriormente, em 700 MHz, na Universidade de Brasília e em 1800 MHz na Universidade de Campinas. O sistema de recepção permite realizar a leitura do sinal e o armazenamento dos dados, por meio de equipamentos que simulam um receptor móvel. As frequências escolhidas fazem parte das faixas utilizadas por tecnologias de comunicação móvel atuais.

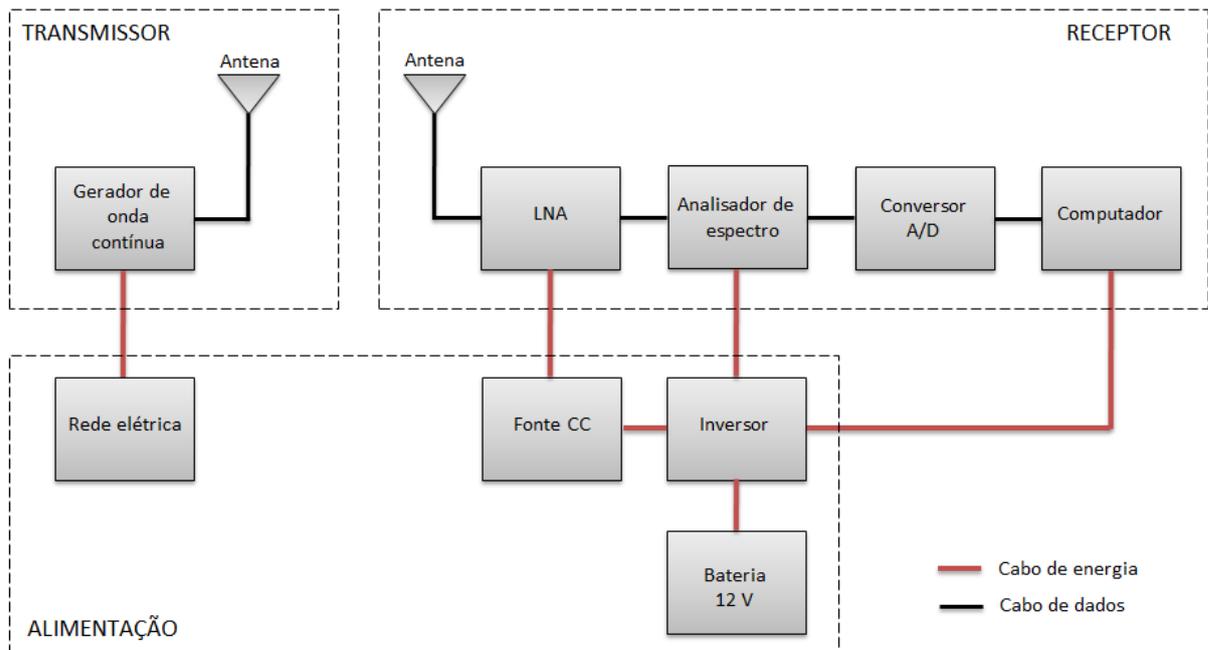


Figura 5.1: Diagrama do sistema de medição.

O equipamento de recepção móvel foi montado especialmente para este fim. Basicamente, a configuração do equipamento receptor consistiu em uma antena de recepção, um amplificador de baixo ruído (*low noise amplifier* – LNA), um analisador de espectro, um equipamento de aquisição de dados e um computador.

Para os ensaios realizados na Universidade de Brasília, o sistema receptor foi instalado em um carro (Figura 5.4), movendo-se com velocidade constante durante as medições. Na Universidade de Campinas foi utilizado um carrinho (Figura 5.5) equipado com um transdutor

de distância para a realização da amostragem do sinal. Ambos os sistemas de recepção contém os mesmos componentes de recepção, condicionamento, processamento e armazenamento de dados.

5.1.2 Sistema de Transmissão

O conjunto transmissor pode ser instalado no topo de prédios – para transmissões *outdoor* – ou no interior de edificações – para transmissões *indoor*. Isto garante excelente flexibilidade para realizar campanhas de medições nos mais variados tipos de ambientes.



Figura 5.2: Sistema de transmissão – UNICAMP [48].

O sistema transmissor possui as seguintes características técnicas:

Gerador de onda contínua

- **Modelo:** FieldFox RF Analyser N9912A;
- **Potência do sinal gerado:** 7 dBm;
- **Frequência do sinal gerado:** 700 MHz (Medições UnB), 1800 MHz (Medições UNI-



Figura 5.3: Sistema de transmissão – UnB.

CAMP) e 2500 MHz (Medições UnB).

Antena de Transmissão

- **Frequências de Transmissão:** 700 MHz (Medições UnB), 1800 MHz (Medições UNI-CAMP) e 2500 MHz (Medições UnB);
- **Potência efetivamente radiada:** 20 W (43 dBm);
- **Antenas de transmissão:** Verticais, Omnidirecionais.

5.1.3 Sistema de Recepção

O sistema de recepção é constituído basicamente por uma antena de recepção com polarização vertical omnidireccional, um amplificador de baixo ruído (*low noise amplifier – LNA*), um analisador de espectro, um equipamento de aquisição de dados e um computador.



Figura 5.4: Sistema de recepção móvel – UnB.

O sistema receptor possui as seguintes características:

Antena de Recepção

- **Polarização:** vertical;
- **Diretividade:** omnidireccional;
- **Modelo:** MM-2412o, para o enlace de 2500 MHz e 1800 MHz;
- **Modelo:** MU-35CI, para o enlace de 700 MHz.



Figura 5.5: Sistema de recepção móvel – UNICAMP [48].

Amplificador de baixo ruído – LNA

- **Modelo:** ZHL-1724HLN-S;
- **Alimentação:** 12 V;
- **Sensibilidade:** -72 dBm.

Analizador de Espectro

- **Modelo:** HP Agilent 8593E;
- **Span:** 0;
- **Sweep Time:** -72 dBm;
- **Video Bandwidth – VBW:** 30 Hz;

- **Resolution Bandwidth – RBW:** 10 kHz;
- **Frequência central:** 700 MHz (Medições UnB), 1800 MHz (Medições UNICAMP) e 2500 MHz (Medições UnB).

Conversor A/D

- **Modelo:** LabJack U12;
- **Frequência de amostragem:** 300 amostras por segundo.

Durante o processo de captura, para que se possa capturar as informações do desvanecimento de pequena escala do sinal, é necessário que a razão entre a velocidade de deslocamento do móvel e a taxa de amostragem seja menor que metade de um comprimento de onda [48].

Computador

Para que o computador consiga entender os dados enviados pelo conversor, é preciso a instalação de um *software* disponível no site do fabricante. Para o estudo em análise foi utilizado o programa LJstream, com as seguintes configurações:

- **Scan Rate:** 300;
- **Number of scans:** 300;
- **Equação da curva:** $P = -74,135 + 77,694V$ para 700 MHz e 2500 MHz (Medições UnB) e $P = -96.2658561 + 80.8051031V$ para 1800 MHz (Medições UNICAMP);

5.2 Investigação Experimental

Durante as campanhas de medição, os dados foram sendo armazenados no computador para o posterior processamento das informações. O sinal coletado em campo é resultado da sobreposição de todos os fenômenos de propagação, como a perda com a distância, o desvanecimento de pequena escala e o desvanecimento de larga escala. Foi desenvolvido um programa de pós-processamento das amostras para efetuar a separação dos fenômenos de desvanecimento do fenômeno de perda com a distância. O primeiro passo para realizar esta separação é efetuar

uma regressão não linear de forma a obter uma equação que modele a perda com a distância em cada cenário. A equação genérica de perda com a distância que melhor se adequou aos dados de campo tem a seguinte forma

$$f(x) = a + bx + c \log_{10}[x]. \quad (5.1)$$

Como a equação resultante da regressão linear de cada conjunto de dados modela a perda com a distância em cada cenário, para obter o vetor de dados contendo apenas o desvanecimento, basta subtrair a função da perda com a distância do vetor de dados. O vetor de dados resultante da subtração é um sinal que contém apenas as variações de longo e de curto prazo, com média próxima de zero.

Após esta filtragem do desvanecimento composto, que considera os efeitos de multipercursos e de sombreamento, a envoltória de cada sinal pôde ser computada e, a partir desta, os parâmetros de desvanecimento da distribuição $\alpha\text{-}\mu/\alpha\text{-}\mu$ foram estimados. De posse destas informações, as estatísticas associadas à envoltória dos sinais medidos podem ser obtidas e a validade da distribuição pode ser investigada.

5.2.1 PDF $\alpha\text{-}\mu/\alpha\text{-}\mu$

Testes de campo de um sistema de comunicação sem fio em 700 MHz, 1800 MHz e 2500 MHz foram realizados na Universidade de Brasília (UnB) e na Universidade de Campinas (Unicamp), a fim de se obter o comportamento estatístico de sinais submetidos ao desvanecimento composto, com efeitos de multipercursos e de sombreamento. Os resultados de campo foram utilizados para uma investigação prática da distribuição $\alpha\text{-}\mu/\alpha\text{-}\mu$. Nos ensaios realizados, o sistema transmissor foi alocado no telhado de um edifício e o sistema receptor se deslocou durante a coleta de dados. O ambiente dos testes caracteriza-se como uma área urbana com edifícios, várias árvores e terreno levemente acidentado.

As PDFs teóricas e empíricas para cada frequência são apresentadas nas Figura 5.6 e 5.7. Na Figura 5.6, são ilustradas as curvas relativas ao comportamento da envoltória do sinal no canal para diferentes dados recolhidos na frequência de 1800 MHz. Observa-se que a distribuição $\alpha\text{-}\mu/\alpha\text{-}\mu$ se ajusta de forma excelente aos dados de campo processados. Tal análise permite que se conceitue que a distribuição composta $\alpha\text{-}\mu/\alpha\text{-}\mu$ modela adequadamente o comportamento do sinal de uma variedade de sistemas de comunicação sem fio operando em 1800 MHz, tais como

os sistemas de telefonia móvel GSM, GPRS e UMTS.

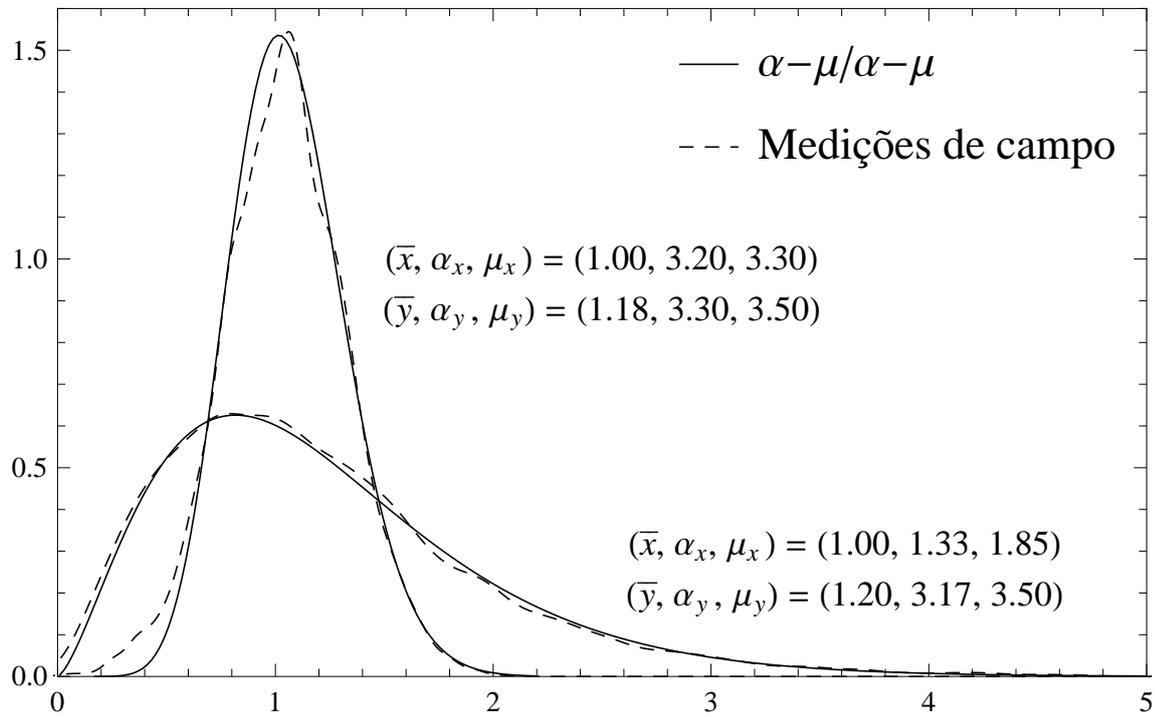


Figura 5.6: Comparação das PDFs teóricas e empíricas em 1800 MHz.

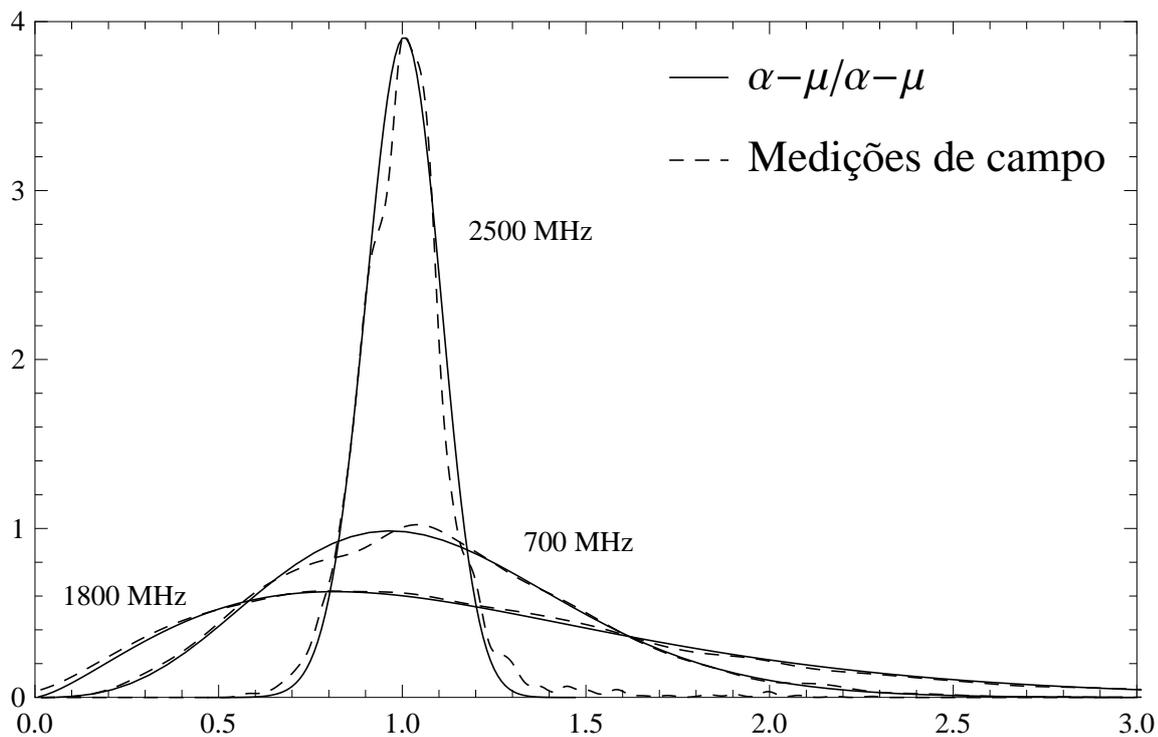


Figura 5.7: Comparação das PDFs teóricas e empíricas em 700 MHz, 1800 MHz e 2500 MHz.

A Figura 5.7 ilustra a eficiência e o ajuste adequado da função distribuição de probabilidade teórica em relação aos dados de campo em 700 MHz, 1800 MHz e 2500 MHz. O resultado obtido permite que se conceitue que a distribuição composta α - μ/α - μ modela adequadamente o comportamento do sinal de uma variedade de sistemas de comunicação sem fio operando em 700 MHz e 2500 MHz, tais como o sistema de telefonia móvel LTE.

Pode ser observado o bom ajuste fornecido pelo modelo teórico em comparação com os dados obtidos nas medições de campo. O modelo de desvanecimento composto α - μ/α - μ permite que o desvanecimento de pequena escala e o desvanecimento de larga escala sejam adequadamente modelados. As PDFs teóricas e empíricas apresentam comportamento e forma adequados.

5.2.2 CDF α - μ/α - μ

As curvas da função de densidade acumulada teóricas e empíricas para cada frequência utilizada no sistema de medição são apresentadas nas Figura 5.8 e 5.9. Na Figura 5.8, são ilustradas as curvas das CDFs para diferentes dados coletados em 1800 MHz. Observa-se que a distribuição α - μ/α - μ se ajusta de forma excelente com os dados de campo processados.

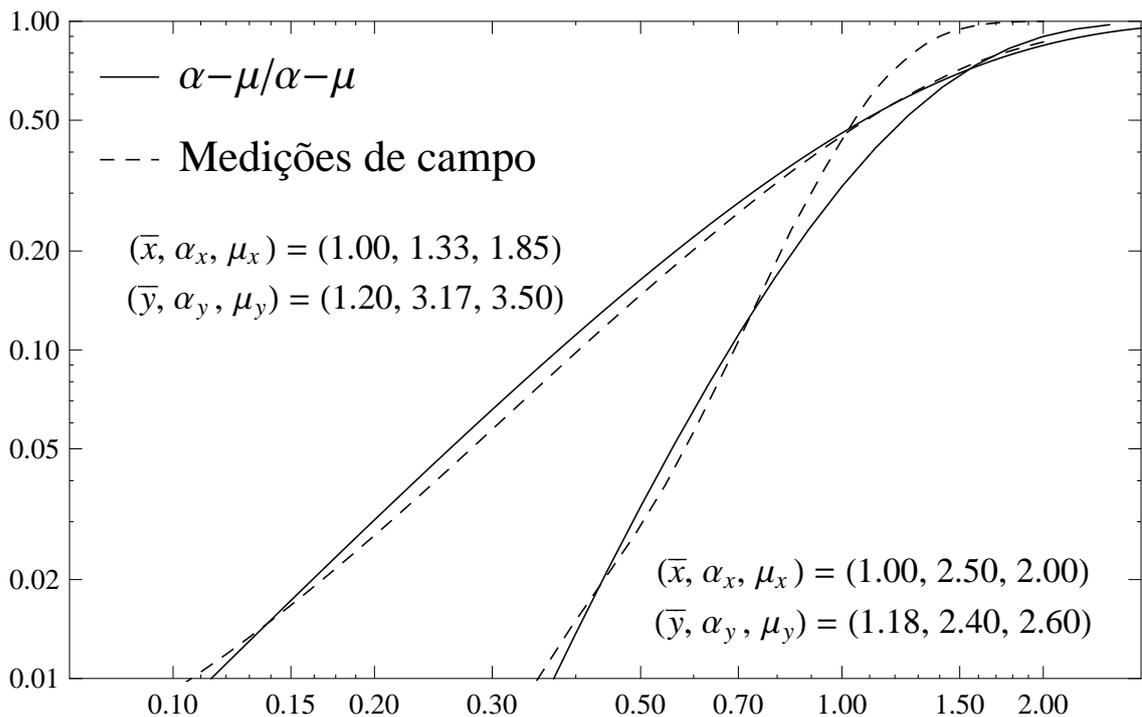


Figura 5.8: Comparação das CDFs teóricas e empíricas em 1800 MHz.

De maneira similar, na Figura 5.9 observa-se também o excelente ajuste entre as curvas da CDF teórica e empírica para as frequências de 700 MHz, 1800 MHz e 2500 MHz. Desta forma, considera-se que a distribuição composta $\alpha\text{-}\mu/\alpha\text{-}\mu$ modela adequadamente o comportamento do sinal de sistemas de comunicação sem fio operando das diversas redes móveis existentes.

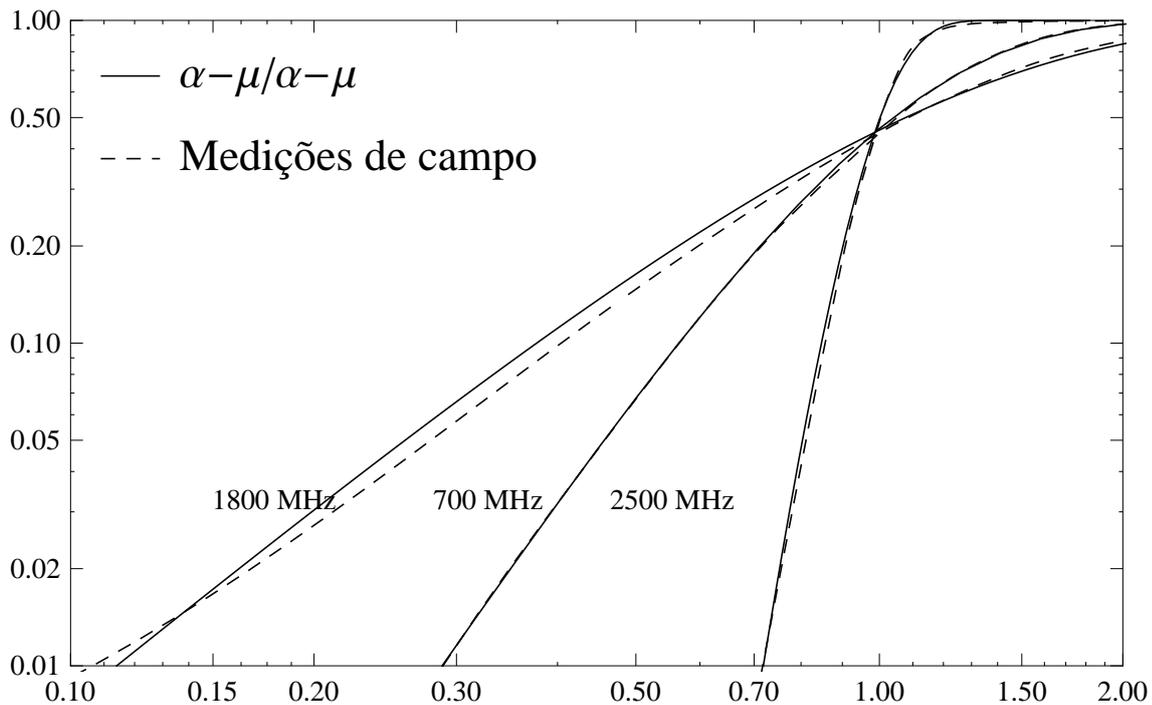


Figura 5.9: Comparação das CDFs teóricas e empíricas em 700 MHz, 1800 MHz e 2500 MHz.

Os resultados comparativos apresentados nas Figuras 5.6, 5.7, 5.8 e 5.9 indicam o ajuste adequado obtido para a distribuição $\alpha\text{-}\mu/\alpha\text{-}\mu$. Observa-se que a distribuição é um modelo de canal eficaz para todas as frequências estudadas e possui grande potencial para a modelagem de canais em uma ampla gama de frequências e em uma grande variedade de cenários.

5.3 Conclusões

Este capítulo apresentou contribuições experimentais ao modelo de canal $\alpha\text{-}\mu/\alpha\text{-}\mu$. Medições de campo foram realizadas e os ambientes investigados ilustraram de forma representativa o desempenho de sinais submetido a canais reais, sujeitos ao desvanecimento composto. As formulações teóricas foram confrontadas com os dados experimentais resultando em excelentes ajustes. Observou-se a validade das estatísticas de primeira ordem da distribuição $\alpha\text{-}\mu/\alpha\text{-}\mu$.

Ressalta-se ainda, a flexibilidade e a simplicidade de implementação da distribuição, tornando-a um modelo muito atrativo para aplicações de canais de rádio móvel realísticos. Ainda, os resultados investigados comprovam a vantagem da distribuição composta $\alpha\text{-}\mu/\alpha\text{-}\mu$ em comparação com os modelos de canais sem composição de efeitos de desvanecimento.

6 Conclusão e Trabalhos Futuros

6.1 Conclusões e Contribuições

Este trabalho apresenta a análise de desempenho de sistemas de sensoriamento espectral utilizando a técnica de detecção de energia para sinais transmitidos em canais submetidos a desvanecimentos generalizados, modelado pelas distribuições Nakagami- m /Gamma e κ - μ /sombreada. Ademais, faz-se uma importante investigação experimental do modelo de desvanecimento composto α - μ / α - μ .

A partir do modelo de desvanecimento composto Nakagami- m /Gamma foram obtidas importantes análises estatísticas, envolvendo especificamente métricas relacionadas aos sistemas de sensoriamento de espectro de rádios cognitivos. Foram obtidas as características de operação do receptor considerando a influência da incerteza ruído e a influência dos desvanecimentos de pequena e de larga escala, modelados pelas distribuições de Nakagami- m e Gamma, respectivamente. Os resultados foram comparados com medições de campo para investigar a validade do modelo composto Nakagami- m /Gamma.

Estatísticas importantes do modelo κ - μ /sombreado foram derivadas neste trabalho. Foram obtidas as características de operação do receptor considerando a influência da incerteza ruído e a influência de ambos os desvanecimentos combinados, mais especificamente, o desvanecimento de pequena escala e o desvanecimento de larga escala. Os resultados foram comparados com medições de campo para investigar a validade do modelo composto κ - μ /sombreado. Os resultados estatísticos, aqui derivados, podem ser aplicados para a modelagem e para a análise de vários sistemas de comunicação sem fio, em particular, para os sistemas de detecção do espectro inerentes a redes de rádio cognitivos.

A distribuição κ - μ inclui, como casos especiais, as distribuições de Rayleigh, Rice e Nakagami- m , possibilitando que a variação de seus parâmetros seja mais abrangente e mais flexível, contribuindo para o ajuste do modelo composto κ - μ /sombreado com os dados experimentais.

A fim de avaliar outro modelo de canal sem fio submetido aos desvanecimentos de pequena e de larga escala generalizados, este trabalho promoveu a comparação da distribuição α - μ / α - μ com dados de campo. A investigação prática abordou sistemas de comunicação sem fio em

três diferentes frequências de transmissão: 700 MHz, 1800 MHz e 2500 MHz. Os dados das medições realizadas representam sinais com potências típicas de sistemas de comunicação sem fio em ambientes suburbanos.

A função de densidade de probabilidade e a função densidade cumulativa da distribuição α - μ / α - μ podem ser consideradas como úteis ferramentas matemáticas para uso em aplicações relacionadas com a avaliação do desempenho de redes de comunicação sem fio submetidas a canais com desvanecimento composto. As medições de campo utilizadas para investigar a validade da distribuição composta α - μ / α - μ , comprovaram sua eficiência em termos práticos. A abordagem aqui tratada permite que se avalie o modelo de canal α - μ / α - μ demonstrando a sua utilidade como ferramenta mais realística na modelagem de canais sem fio, apresentando uma base informativa para uma posterior análise em sistemas de rádios cognitivos com ênfase em sensoriamento espectral.

Todos os resultados apresentados e analisados possuem oportuna utilidade para uso em aplicações emergentes que envolvam sistemas de telecomunicações baseados em rádios cognitivos. Diante da exposição dos resultados obtidos neste trabalho, observa-se o valor contributivo da análise e dos estudos propostos em prol dos avanços tecnológicos do setor de comunicações sem fio. As principais contribuições deste trabalho envolvem a investigação das estatísticas de canais em sensoriamento espectral envolvendo a utilização de distribuições compostas que modelam o desvanecimento de canais sem fio, Nakagami- m /Gamma e κ - μ /sombreada, além da análise prática do modelo α - μ / α - μ .

6.2 Trabalhos Futuros

Não obstante o reconhecimento das contribuições deste trabalho, muitos estudos importantes ainda devem ser realizados a fim de se aprimorar o desenvolvimento e de se permitir a implementação de sistemas de rádios cognitivos. Desta forma, apresentam-se, a seguir, as recomendações para o aprofundamento das análises e sugestões para futuros trabalhos.

- Realizar medições em outros ambientes e em outras frequências de transmissão para que se possa promover validações e comparações mais abrangentes;
- Avaliar o desempenho de sistemas de sensoriamento espectral submetido a canais com outros modelos de desvanecimento compostos;
- Investigar o comportamento de sistemas de sensoriamento espectral em regime não cooperativo e cooperativo em canais submetidos ao desvanecimento composto modelado pela distribuição $\alpha\text{-}\mu/\alpha\text{-}\mu$;
- Aprimorar o modelo de sensoriamento cooperativo para que outras avaliações sejam realizadas;
- Analisar outras métricas de canais em cenário de sensoriamento espectral.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ANATEL. *Abril de 2015 fecha com 283,52 milhões de acessos móveis*. 2015. http://www.anatel.gov.br/institucional/index.php?option=com_content&view=article&id=476.
- [2] ANATEL. *Brasil encerra fevereiro de 2015 com 19,71 milhões de acessos de TV por assinatura*. 2015. <http://www.anatel.gov.br/Portal/exibirPortalNoticias.do?acao=carregaNoticia&codigo=36830>.
- [3] ANATEL. *Fique atento ao calendário de desligamento*. 2015. http://www.anatel.gov.br/institucional/index.php?option=com_content&view=article&id=422:fique-atento-ao-calendario-de-desligamento&catid=47&Itemid=430.
- [4] Mitola III, J. *Cognitive radio: An integrated agent architecture for software defined radio*. Tese (Doutorado) — Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden, Maio 2000.
- [5] WANG, W. Spectrum sensing for cognitive radio. *Third IEEE International Symposium on Intelligent Information Technology Application Workshops (ITAW)*, p. 410–412, Fevereiro 2009.
- [6] AKYILDIZ, I. F. et al. A survey on spectrum management in cognitive radio networks. *IEEE Communications Magazine*, v. 46, n. 4, p. 40–48, Abril 2008.
- [7] CLARKE, R. H. A statistical theory of mobile-radio reception. *Bell Syst. Tech. J.*, v. 47, p. 957–1000, Agosto 1968.
- [8] NAKAGAMI, M. The m distribution, a general formula of intensity distribution of rapid fading. *Statistical methods in radio wave propagation*, Oxford: Pergamon Press, p. 3–36, Fevereiro 1960.
- [9] RICE, S. O. Mathematical analysis of random noise. *Bell Syst. Tech. J.*, v. 23, n. 3, p. 282–332, Julho 1944.

- [10] YACOUB, M. D. The α - μ distribution: a physical fading model for the stacy distribution. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 56, n. 1, p. 27–34, Janeiro 2007.
- [11] YACOUB, M. D. The κ - μ distribution and the η - μ distribution. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, IEEE, v. 49, n. 1, p. 68–81, Fevereiro 2007.
- [12] SOFOTASIOS, P. C.; FREEAR, S. The κ - μ extreme/gamma distribution: A physical composite fading model. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, p. 1398–1401, Março 2011.
- [13] SIMON, M. K.; ALOUINI, M.-S. *Digital Communication over Fading Channels: A Unified Approach to Performance Analysis*. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 2010.
- [14] PARIS, J. F. Statistical characterization of κ - μ shadowed fading channels. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 63, n. 2, p. 518–526, Fevereiro 2014.
- [15] SOFOTASIOS, P. C.; FREEAR, S. The α - κ - μ /gamma distribution: A generalized non-linear multipath/shadowing fading model. *Annual IEEE India Conference (INDICON)*, v. 56, p. 1–6, Dezembro 2011.
- [16] SOFOTASIOS, P. C.; FREEAR, S. On the κ - μ /gamma composite distribution: A generalized multipath/shadowing fading model. *IEEE Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC)*, p. 390–394, Outubro 2011.
- [17] FARIA, A. J. de. *Contribuições à Análise de Desempenho de Protocolos de Múltiplo Acesso em Sistemas de Rádios Cognitivos*. 2014. Dissertação de Mestrado - Instituto Nacional de Telecomunicações (Inatel).
- [18] ABRAMOWITZ, M.; STEGUN, I. A. *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*. 10th. ed. [S.l.]: National Bureau of Standards, 1972.
- [19] LEON-GARCIA, A. *Probability, Statistics, and Random Processes for Electrical Engineering*. 3rd. ed. Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2008.
- [20] STUBER, G. L. *Principles of Mobile Communication Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*. 2nd. ed. United States of America: Academic Publishers, 2002.

- [21] DIAS, U. S.; YACOUB, M. D. On the α - μ autocorrelation and power spectrum functions: Field trials and validation. *IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*, p. 1–6, Dezembro 2009.
- [22] LEONARDO, E. J.; YACOUB, M. D. The product of two α - μ variates and the composite α - μ multipath-shadowing model. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, n. 99, Julho 2014.
- [23] SAUNDERS, S. R.; ZAVALA, A. A. *Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems*. 2nd. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, Ltd, 2007.
- [24] ABDI, A.; KAVEH, M. On the utility of gamma pdf in modeling shadow fading (slow fading). *IEEE 49th Vehicular Technology Conference*, v. 3, p. 2308–2312, Julho 1999.
- [25] KOSTIC, I. M. Analytical approach to performance analysis for channel subject to shadowing and fading. *IEEE Proceedings on Communications*, v. 152, n. 6, p. 821–827, Dezembro 2005.
- [26] REIG, J.; RUBIO, L. Estimation of the composite fast fading and shadowing distribution using the log-moments in wireless communications. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v. 12, n. 8, p. 3672–3681, Agosto 2013.
- [27] von Glehn, F. *Análise de Desempenho de Redes de Rádios Cognitivos sob Canais em Desvanecimento Generalizado*. 2013. Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília (UnB).
- [28] VERMA, P. K.; TALUJA, S.; DUA, R. L. Performance analysis of energy detection, matched filter detection & cyclostationary feature detection spectrum sensing techniques a survey on spectrum management in cognitive radio networks. *International Journal Of Computational Engineering Research (IJCER)*, v. 2, n. 5, p. 1296–1301, Setembro 2012.
- [29] WYGLINSKI, A. M.; NEKOVEE, M.; HOU, Y. T. *Cognitive Radio Communications and Networks*. 1st. ed. United States of America: ELSEVIER Inc., 2010.
- [30] AKYILDIZ, I. F. et al. Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks: A survey. *ELSEVIER Physical Communication*, v. 4, n. 1, p. 40–62, Março 2011.

- [31] ALMEIDA, E. P. L. de. *Desenvolvimento de Técnica de Sensoriamento do Espectro Embasada em Detecção de Energia para Aplicações em Sistemas Rádio-Cognitivos*. 2010. Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília (UnB).
- [32] CORDEIRO, C. et al. Ieee 802.22: the first worldwide wireless standard based on cognitive radios. *First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, p. 328–337, Novembro 2005.
- [33] MCHENRY, M. et al. Xg dynamic spectrum access field test results. *IEEE Communications Magazine*, v. 45, n. 6, p. 51–57, Junho 2007.
- [34] ANNAMALAI, A. et al. Unified analysis of energy detection of unknown signals over generalized fading channels. *7th IEEE International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, p. 636–641, Julho 2011.
- [35] DIGHAM, F. F.; ALOUINI, M. S.; SIMON, M. K. On the energy detection of unknown signals over fading channels. *IEEE Transactions on Communications*, v. 55, n. 1, p. 21–24, Janeiro 2007.
- [36] SOFOTASIOSA, P. C.; REBEIZ, E.; FREEAR, S. Energy detection based spectrum sensing over $\kappa - \mu$ and $\kappa - \mu$ extreme fading channels. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 62, n. 3, p. 1031–1040, Março 2013.
- [37] NUTALL, A. H. Some integrals involving the q_M function. *IEEE Transactions on Information Theory*, v. 21, n. 1, p. 95–96, Janeiro 1975.
- [38] DILLARD, G. M. Recursive computation of the generalized q function. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, p. 614–615, Julho 1973.
- [39] LIU, Q.; GAO, Y. G. J.; LIU, S. Robustness improvement against noise uncertainty by cooperative spectrum sensing. *IEEE International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, p. 1–6, Outubro 2010.
- [40] BENÍTEZ, M. L.; CASADEVALL, F.; MARTELLA, C. Performance of spectrum sensing for cognitive radio based on field measurements of various radio technologies. *IEEE European Wireless Conference (EW)*, p. 969–977, Abril 2010.

- [41] ALOQLAH, M. Performance analysis of energy detection-based spectrum sensing in κ - μ shadowed fading. *IET Electronics Letters*, v. 50, n. 25, p. 1944–1946, Dezembro 2014.
- [42] MATHAI, A. M.; HAUBOLD, H. J. *Special Functions for Applied Scientist*. [S.l.]: Springer, New York, 2008.
- [43] PIRETTI, S. P.; JR, P. C. B. B.; DIAS, U. S. On the *alpha-mu/gamma* composite distribution: Field trials and validation. *XXXI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBrT)*, Setembro 2013.
- [44] SUZUKI, H. A statistical model for urban radio propagation. *IEEE Transactions on Communications*, v. 25, n. 7, p. 673–680, Julho 1977.
- [45] ABU-DAYYA, A. A.; BEAULIEU, N. C. Micro- and macrodiversity ncfsk (dpsk) on shadowed nakagami-fading channels. *IEEE Transactions on Communications*, v. 42, n. 9, p. 2693–2702, Setembro 1994.
- [46] SILVA, W. de A.; MOTA, K. M.; DIAS, U. S. Spectrum sensing over nakagami-m/gamma composite fading channel with noise uncertainty. *IEEE Radio and Wireless Symposium*, IEEE, Janeiro 2015.
- [47] COULSON, A. J.; WILLIAMSON, A. G.; VAUGHAN, R. G. Improved fading distribution for mobile radio. *IEEE Proceedings on Communications*, v. 145, n. 3, p. 197–202, Junho 1998.
- [48] DIAS, U. S. *Distribuição de Fase e Estatísticas Correlacionadas em Ambientes Sem Fio: Teoria e Validação Experimental*. 2010. Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).