

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CÂMPUS EXPERIMENTAL DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA

MATEUS TÓDERO GUIMARÃES

**Avaliação da Probabilidade de Erro de Bit para as
Modulações BPSK e M -QAM em Redes Cooperativas do
tipo Amplifica-e-Encaminha de Ganho Variável**

São João da Boa Vista
2019

MATEUS TÓDERO GUIMARÃES

Avaliação da Probabilidade de Erro de Bit para as Modulações BPSK e M -QAM em Redes Cooperativas do tipo Amplifica-e-Encaminha de Ganho Variável

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia de Telecomunicações do Câmpus de São João da Boa Vista, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia de Telecomunicações.

Orientador: Prof. Dr. Edgar Eduardo Benitez Olivo

São João da Boa Vista
2019

Guimarães, Mateus Tódero

Avaliação da probabilidade de erro de bit para as modulações BPSK e M-QAM em redes cooperativas do tipo amplifica-e-encaminha de ganho variável /Mateus Tódero Guimarães. – São João da Boa Vista, 2019.

49 p. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso – Câmpus Experimental de São João da Boa Vista – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

Orientador: Prof. Dr. Edgar Eduardo Benitez Olivo

Bibliografia

1. Comunicações digitais 2. Sistemas de comunicação sem fio 3. Telecomunicações

CDD 23. ed. – 621.382

Ficha catalográfica elaborada pela [Biblioteca-BJB](#)

Bibliotecário responsável: João Pedro Alves Cardoso – CRB-8/9717

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CÂMPUS EXPERIMENTAL DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**AVALIAÇÃO DA PROBABILIDADE DE ERRO DE BIT PARA AS
MODULAÇÕES BPSK E M-QAM EM REDES COOPERATIVAS DO
TIPO AMPLIFICA-E-ENCAMINHA DE GANHO VARIÁVEL**

Aluno: Mateus Tódero Guimarães

Orientador: Prof. Dr. Edgar Eduardo Benitez Olivo

Banca Examinadora:

- Prof. Dr. Edgar Eduardo Benitez Olivo (Orientador)
- Prof^a. Dr^a. Cintya Wink de Oliveira Benedito (Examinador)
- Prof^a. Dr^a. Rita de Cássia Domingos (Examinador)

A ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no prontuário do aluno (Expediente nº 27/2018)

São João da Boa Vista, 24 de Janeiro de 2019

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer ao meu orientador, Prof. Dr. Edgar Eduardo Benitez Olivo, que me aceitou como orientando para iniciação científica e também para este trabalho de conclusão de curso e que ao longo do período das atividades, me ensinou não apenas conceitos sobre telecomunicações, mas também sobre disciplina e dedicação.

Aos meus pais, Angela Aparecida Tódero e Naldomar Lima Guimarães, e a minha irmã, Mariana Tódero Guimarães, pelo apoio, amor e confiança que sempre me deram ao longo da vida.

A minha madrinha, Lorena Guimarães Scheffer, e ao meu tio, Marcos Scheffer, que além do apoio e dos ensinamentos, me ajudaram financeiramente durante meu período de estudos na Unesp de Bauru e me acolheram na casa deles durante meu período de estágio. Também gostaria de agradecer a minha prima, Nicole Scheffer, que também me ajudou neste período.

Ao meus tios, Zeca e Elaine Gouveia, que sempre me apoiaram. E ao meu tio Felipe Guimarães, que como me inspirou a seguir para a área de engenharia.

A minha noiva, Natalia Ferreira Costa, que durante todo o período do ensino superior me deu forças, que sempre me apoiou durante os estudos e esteve comigo em todas as vezes em que precisei de ajuda.

Também gostaria de agradecer aos meus amigos de Bauru, Bruno, Vinicius, Matheus, Felipe, Rodrigo, Luiz, Gabriel e Nelson, que me ajudaram de diversas maneiras durante os 3 anos na Unesp de Bauru.

Também gostaria de agradecer aos meus amigos da Unesp de São João da Boa Vista, Pedro, Bruno, Jéssica, Letícia, que estiveram comigo durante essa reta final da faculdade.

A minha avó, Maria do Carmo Lima Guimarães, e meu avô, José Ronaldo Damasceno Guimarães, que infelizmente não estão mais presentes para ver essa nova conquista da minha vida, mas que sei que estão olhando por mim. E agradeço a Deus, por ter me guiado por este caminho e até este momento.

RESUMO

A quantidade crescente de dispositivos móveis gera um maior requerimento de desempenho nas redes celulares existentes. Somado a isto, a cada nova geração de equipamentos surgem novas aplicações multimídia e funções, que exigem uma melhor qualidade de serviço. Desta forma, novas técnicas têm sido propostas com o objetivo de melhorar o desempenho das comunicações sem fio, a fim de propiciar assim uma transmissão de dados com maior confiabilidade, com maior eficiência espectral, ampla área de cobertura e sem requerimento adicional de potência transmitida. Entre os diversos métodos criados para atender tais requerimentos, está o conceito de comunicações cooperativas. Neste contexto, este trabalho tem por objetivo realizar a avaliação do desempenho em termos da probabilidade de erro de bit de uma rede cooperativa composta por uma fonte, um destino e um retransmissor, que opera em modo *half duplex* e sob o protocolo amplifica-e-encaminha de ganho variável. Para tanto, os esquemas de modulação BPSK e M-QAM são considerados. Consideram-se ainda cenários em que as transmissões ocorrem através de canais sujeitos a ruído AWGN e desvanecimento Rayleigh. Para tanto foram elaboradas rotinas de simulação baseadas no método de Monte Carlo. Além disso, o desempenho do sistema sob estudo é comparado com aquele de um sistema não cooperativo, que considera apenas a transmissão direta entre fonte e destino, sem uso de retransmissores.

Palavras Chaves: Amplifica-e-encaminha, BPSK, comunicações cooperativas, *half duplex*, M-QAM, simulações de Monte Carlo.

ABSTRACT

The growing number of mobile devices generates a higher requirement in performance on the current cellular networks. In addition, with each new generation of equipment, new multimedia applications and services, which require a better quality of service, are emerging. In this way, new techniques have been proposed with the aim of improving the performance of wireless communications, and providing a more reliable data transmission, with higher spectral efficiency, wider coverage area and without additional requirement of transmit power. Among the various methods created to meet such requirements, the concept of cooperative communications. In this context, this work intends to perform the performance evaluation in terms of the bit error rate for a cooperative network composed by a source, a destination, and a relay which operates in half duplex mode and under variable-gain amplify-and-forward protocol. To this end the BPSK and M-QAM modulation schemes are considered. Scenarios in which the transmissions occur through channels subject to AWGN and Rayleigh fading are investigated. Monte Carlo simulations were developed. In addition, the performance of the system under study is compared to that of a non-cooperative system, which considers only the direct transmission between source and destination, without the use of relays.

Keywords: Amplify-and-forward, BPSK, cooperative communications, half duplex, M-QAM, Monte Carlo simulations.

LISTA DE FIGURAS

1.	Densidade espectral constante para ruído AWGN.....	18
2.	Diagramas de constelações para modulações 4-QAM, 16-QAM e 64-QAM 19	
3.	Exemplo de sistema de comunicação cooperativa com dois saltos, em que uma fonte (<i>S</i>) comunica-se com um destino (<i>D</i>) através de <i>relay</i> (<i>R</i>).....	20
4.	(a) Transmissão entre fonte (<i>S</i>) e destino (<i>D</i>) através de dois saltos, por meio de um <i>relay</i> (<i>R</i>) operando sob o protocolo AF. (b) Sistema de transmissão direta, em que uma fonte (<i>S</i>) se comunica com um destino (<i>D</i>)	24
5.	Distribuição de <i>Rayleigh</i> para $\Omega = 0.5$	25
6.	Diagramas de constelações para os esquemas BPSK e <i>M</i> -QAM com a repre- sentação do fator de distância entre símbolos <i>c</i>	26
7.	BER vs. SNR transmitida em canais AWGN, considerando sistemas de transmissão direta e cooperativo, para o esquema de modulação BPSK ..	37
8.	BER vs. SNR transmitida em canais AWGN, considerando sistemas de transmissão direta e cooperativo, para o esquema de modulação 4-QAM 37	
9.	BER vs. SNR transmitida em canais AWGN, considerando sistemas de transmissão direta e cooperativo, para o esquema de modulação 16-QAM 38	
10.	BER vs. SNR transmitida em canais AWGN, considerando sistemas de transmissão direta e cooperativo, para o esquema de modulação 64-QAM 39	
11.	BER vs. SNR transmitida em canais com desvanecimento, considerando sistemas de transmissão direta e cooperativo, para o esquema de modulação BPSK.....	37
12.	BER vs. SNR transmitida em canais com desvanecimento, considerando sistemas de transmissão direta e cooperativo, para o esquema de modulação 4-QAM.....	41
13.	BER vs. SNR transmitida em canais com desvanecimento, considerando sistemas de transmissão direta e cooperativo, para o esquema de modulação 16-QAM.....	42
14.	BER vs. SNR transmitida em canais com desvanecimento, considerando sistemas de transmissão direta e cooperativo, para o esquema de modulação 64-QAM.....	43
15.	BER vs. SNR transmitida em canais AWGN, considerando sistema de trans- missão direta, para os esquemas de modulação BPSK e <i>M</i> -QAM	44

16.	BER vs. SNR transmitida em canais com desvanecimento, considerando sistema de transmissão direta, para os esquemas de modulação BPSK e M-QAM.....	44
17.	BER vs. SNR transmitida em canais AWGN, considerando sistema cooperativo, para os esquemas de modulação BPSK e M-QAM.	45
18.	BER vs. SNR transmitida em canais com desvanecimento, considerando sistema cooperativo, para os esquemas de modulação BPSK e M-QAM. .	46

LISTA DE ACRÔNIMOS

1G	Primeira Geração
2G	Segunda Geração
3G	Terceira Geração
4G	Quarta Geração
5G	Quinta Geração
3GPP	<i>Third Generation Partnership Project</i>
AF	Amplifica-e-Encaminha (<i>Amplify-and-Forward</i>)
AM	<i>Amplitude Modulation</i>
AMPS	<i>Advanced Mobile Phone System</i>
ASK	<i>Amplitude-Shift Keying</i>
AWGN	<i>Additive White Gaussian Noise</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
D-AMPS	<i>Digital-Advanced Mobile Phone System</i>
DF	Decodifica-e-Encaminha (<i>Decode-and-Forward</i>)
FM	<i>Frequency Modulation</i>
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i>
FD	<i>Full Duplex</i>
FSK	<i>Frequency-Shift Keying</i>
GSM	<i>Global System Mobile</i>
HD	<i>Half Duplex</i>
i.i.d.	Independentes e Identicamente Distribuídos
IMTS	<i>Improved Mobile Telephone Service</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
JTACS	<i>Japan Total Access Communication System</i>
LoS	<i>Line of Sight</i>
LTE	<i>Long-Term Evolution</i>
LTE-A	<i>Long-Term Evolution-Advanced</i>
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
M-QAM	<i>Multi-Level Quadrature Amplitude Modulation</i>
MTS	<i>Mobile Telephone Service</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
PDF	Função Densidade de Probabilidade (<i>Probability Density Function</i>)
PSTN	<i>Public Switched Telephone Network</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>

QSK	<i>Quadrature-Shift Keying</i>
RF	<i>Rádio Frequência</i>
SMS	<i>Short Message System</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
TACS	<i>Total Access Communication System</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
TD-SCDMA	<i>Time Division-Synchronous Code Division Multiple Access</i>
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telephone Service</i>
VHF	<i>Very High Frequency</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

α	expoente de perda de percurso
β	fator de amplificação do <i>relay</i> operando sob o protocolo amplifica-e-encaminha
c	fator de distância de símbolo
d_1	distância entre os nós fonte e <i>relay</i>
d_2	distância entre os nós <i>relay</i> e destino
D	nó destino
$E[\cdot]$	esperança matemática
$f_{\gamma_0}(\cdot)$	PDF para a variável aleatória γ_0
$f_{\gamma_1}(\cdot)$	PDF para a variável aleatória γ_1
$f_{\gamma_2}(\cdot)$	PDF para a variável aleatória γ_2
$f_{\gamma_1, \gamma_2}(\cdot, \cdot)$	PDF conjunta para as variáveis aleatórias γ_1 e γ_2
γ_0	SNR recebida no enlace entre fonte e destino
γ_1	SNR recebida no enlace entre fonte e <i>relay</i>
γ_2	SNR recebida no enlace entre <i>relay</i> e destino
γ_{e2e}	SNR recebida fim-a-fim
h_0	coeficiente de canal entre fonte e destino
h_1	coeficiente de canal entre fonte e <i>relay</i>
h_2	coeficiente de canal entre <i>relay</i> e destino
k	quantidade de iterações
λ	comprimento de onda do sinal RF
M	ordem de modulação
μ	média
n_0	ruído AWGN no receptor do destino
n_1	ruído AWGN no receptor do <i>relay</i>
n_2	ruído AWGN no receptor do destino para o sistema cooperativo
N	potência do ruído AWGN
ω	fator de compensação para o sistema cooperativo
Ω_0	ganho médio do canal para o enlace entre os nós fonte e destino
Ω_1	ganho médio do canal para o enlace entre os nós fonte e <i>relay</i>
Ω_2	ganho médio do canal para o enlace entre os nós <i>relay</i> e destino
P_s	probabilidade de erro de símbolo
P_b	probabilidade de erro de bit
P_R	potência transmitida pelo <i>relay</i>
P_S	potência transmitida pela fonte
$Q(\cdot)$	função Q
R	nó <i>relay</i>

S	nó fonte
σ	desvio padrão
y	sinal recebido para sistema de transmissão direta
y_D	sinal recebido pelo nó destino para o sistema cooperativo
y_R	sinal recebido pelo nó <i>relay</i> para o sistema cooperativo
x	sinal transmitido pela fonte

SUMÁRIO

	Sumário	13
1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Comunicações sem fio	14
1.1.1	Primeira Geração (1G) até a Quinta Geração (5G)	14
1.2	Imparidades do canal sem fio	16
1.2.1	AWGN	17
1.2.2	Desvanecimento	17
1.3	Modulação	18
1.3.1	Modulação <i>M</i> -QAM	19
1.4	Comunicação Cooperativa	20
1.4.1	<i>Relay</i>	21
1.4.2	Protocolos de Retransmissão	21
1.4.3	Modos de Retransmissão	22
1.5	Motivação e trabalhos relacionados	22
1.6	Contribuições e organização do trabalho	23
2	MODELO DO SISTEMA	24
2.1	Fator de distância de símbolo c	25
2.1.1	BPSK	25
2.1.2	<i>M</i> -QAM	26
2.2	Transmissão Direta	27
2.3	Sistema Cooperativo	27
3	PROBABILIDADE DE ERRO DE BIT (BER)	29
3.1	Canal AWGN	29
3.1.1	BPSK	29
3.1.2	<i>M</i> -QAM	30
3.2	Canal de desvanecimento	30
3.2.1	BPSK	30
3.2.2	<i>M</i> -QAM	31
4	RESULTADOS NUMÉRICOS	32
5	CONCLUSÕES	47
	REFERÊNCIAS	48

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentados conceitos relativos ao assunto abordado no trabalho. Primeiramente, um breve histórico relacionado as comunicações sem fio é apresentado na Seção 1.1. Em seguida, na Seção 1.2 são apresentados conceitos sobre as principais imparidades do canal sem fio. Na Seção 1.3, são apresentados conceitos relacionados a modulação, com ênfase nas modulações BPSK e M-QAM. Por fim na Seção 1.4, são apresentados conceitos sobre as comunicações cooperativas, inclusive sobre o retransmissor, à partir de agora indicado como *relay*.

1.1 COMUNICAÇÕES SEM FIO

A comunicação sem fio tornou-se indispensável, mudando o estilo de vida dos indivíduos, sendo a maneira mais importante de transportar qualquer tipo de informação, como voz, vídeo e dados, seja por sinais Rádio Frequência (RF) ou por micro-ondas [1,2]. Atualmente as redes sem fio, além de permitirem a comunicação entre indivíduos também permitem a comunicação com máquinas, e futuramente irão possibilitar novas formas de interações com o advento da internet das coisas (IoT, *Internet of Things*) e a quinta geração (5G). Porém, para que a tecnologia atingisse o nível presente foram necessários muitos anos de desenvolvimento e estudos. O conceito moderno de comunicação sem fio está relacionado com a transmissão e recepção de ondas eletromagnéticas, conceitos que foram teorizados por Maxwell, entre 1861 e 1862, e demonstrados na prática por Hertz, em 1887 [2,3]

Muitos cientistas continuaram os experimentos de Hertz, contudo em 1901, G. Marconi, conseguiu transmitir um sinal de rádio através do oceano Atlântico com um sistema de rádio grande e dispendioso com uma antena de 150 m. Em 1906, L.D. Forest inventou um tubo á vácuo que possibilitou diminuir o tamanho do sistema de rádio [2]. Claude Shannon em seu artigo intitulado "*The mathematical theory of communication*", foi responsável por avanços na área da teoria da informação e codificação, criando as fundações para digitalização, e também projetou a arquitetura de comunicação que é utilizada por todos os sistemas de comunicações [2,4].

1.1.1 Primeira Geração (1G) até a Quinta Geração (5G)

Nos últimos anos a comunicação sem fio presenciou um crescimento vertiginoso, principalmente na área móvel com o desenvolvimento de quatro gerações de revolução tecnológica que receberam a nomenclatura de 1G até 4G [5]. Estes avanços estão atrelados diretamente a necessidade de melhor desempenho do dispositivo, o surgimento de

novas funcionalidades e o aumento na quantidade de usuários que conseqüentemente demandam um melhor desempenho da rede com intuito de atender os requerimentos exigidos [6].

A primeira tecnologia que precedeu o 1G surgiu durante a década de 40, esta tecnologia era conhecida como serviço de telefonia móvel (MTS, *Mobile Telephone Service*), e tratava-se de um sistema de rádio de frequência muito alta (VHF, *Very High Frequency*) que era ligado a rede de telefonia pública comutada (PSTN, *Public Switched Telephone Network*). Em seguida surgiu o serviço de telefonia móvel melhorado (IMTS, *Improved Mobile Telephone Service*), que era baseado em VHF e em frequências ultra-altas (UHF, *Ultra High Frequency*) [7]. Estes dispositivos móveis eram apenas destinados para automóveis.

O 1G surgiu em seguida com transmissão baseada em sistemas analógicos, estes eram limitados, realizando apenas a transmissão de voz com baixa qualidade, também tinham capacidade limitada e segurança falha, sendo possível clonar os aparelhos [8,9]. A tecnologia utilizada era conhecida como AMPS (*Advanced Mobile Phone System*), criada pelo Dr. Martin Cooper e outros envolvidos. Na Europa era usada a TACS (*Total Access Communication System*) e no Japão, a JTACS (*Japan TACS*), ambas eram próximas e utilizavam frequências diferentes de 800 MHz que era a utilizada nos Estados Unidos [9]. Apesar de algumas falhas, no 1G foi implementado o sistema de arquitetura que é usada até hoje e também a técnica de reuso de frequência.

Em seguida surgiu a segunda geração (2G), com a principal diferença de que esta tecnologia era baseada em transmissões de sinal de rádio digitais enquanto a primeira geração era baseada em sinais de rádio analógicos [5]. Com a melhoria nos aspectos técnicos e comerciais e políticas de normalização, os dispositivos móveis tornaram-se mais acessíveis, conseqüentemente aumentando a quantidade de usuários das redes móveis [7, 10]. Destaca-se a criação do SMS (*Short Message System*), considerada uma forma de transmissão de dados [11]. Com a tecnologia 2G, surgiram alguns protocolos para os equipamentos: GSM (*Global System Mobile*), TDMA (*Time Division Multiple Access*), CDMA (*Code Division Multiple Access*), D-AMPS (*Digital-AMPS*) e o PHS (*Personal Handy-phone System*). Dentre estes o mais difundido foi o GSM [7].

Apesar dos avanços proporcionados pelo 2G, alguns problemas que impactavam o custo e a qualidade de serviço (QoS, *Quality of Service*) do sistema, ainda permaneciam sem solução [10]. Antes da tecnologia 3G, surgiu o 2.5 G, que introduziu o serviço de comutação de pacotes, além do serviço de voz realizado pela comutação de circuitos [11, 12]. Dando seqüência às tecnologias, surge a terceira geração (3G), cujo principal objetivo era proporcionar aos usuários diversos serviços, que incluía voz, data e vídeo, e ao mesmo tempo utilizando o mínimo possível da rede [10]. Este diferentemente do 1G e 2G, em que os sistemas empregaram basicamente a comutação de circuitos, empregou também a comutação de IP [12, 13]. Os três protocolos utiliza-

dos para o 3G foram CDMA2000, TD-SCDMA (*Time Division-Synchronous CDMA*) e o UMTS (*Universal Mobile Telecommunications Systems*), sendo este último o sistema mais dominante dentre os três [14,15].

O 3G e o 3.5G proporcionaram um cenário que permitiu o aumento da demanda de dados móveis enquanto que a quantidade de chamadas de voz sofreram estagnação. Paralelamente surgiam os *smartphones* que apresentavam diversas funcionalidades com uma interface mais amigável, como por exemplo o sistema operacional *Android* [14]. Conseqüentemente o número de usuários e dispositivos aumentou causando um congestionamento das redes 2G e 3G gerando a necessidade de aprimorar a capacidade das redes [14]. Visando aumentar a taxa de dados, melhorar a eficiência espectral, serviços disponibilizados e diminuir os custos da rede, a 3GPP (*Third Generation Partnership Project*) estabeleceu o LTE (*Long-Term Evolution*). O LTE apesar de utilizar a nomenclatura de 4G, não possui os requisitos técnicos para uma rede 4G sem fio, estabelecidos pelos documentos, *Releases 8 e 9*, da 3GPP. Este sistema surgiu com uma arquitetura baseada em comutação de pacotes, ou seja uma rede IP (*IP Network*), diferentemente da estruturação anterior, que conciliava comutação de circuitos com a comutação de pacotes [9,13]. Também foi implementada uma nova técnica de modulação, OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), que permite aumento na eficiência espectral e torna o sistema mais robusto ao desvanecimento, e a técnica de múltiplas antenas, MIMO (*Multiple Input Multiple Output*).

Apesar dos grandes avanços proporcionados pelo LTE, este ainda não atendia os requisitos estipulados pela 3GPP. Deste modo foram realizados importantes aprimoramentos que deram início ao padrão LTE-A (*LTE-Advanced*), que foi padronizado no *Release 10* da 3GPP. Surgiram novas implementações para as redes sem fio, como a possibilidade de agregar portadoras (*Carrier Aggregation*) que permite um aumento na capacidade de envio de dados, a melhoria no MIMO, possibilitando maiores taxas de dados [16]. Outra implementação importante que surgiu no LTE-A, e foi padronizada no *Release 10*, foi a inserção dos nós *relays* nas redes móveis, permitindo a implementação de sistemas cooperativos e também auxiliando no aumento da cobertura das células [16]. Para o 5G, a cooperação não vai estar limitada apenas a auxiliar na retransmissão de informação. Na quinta geração também vai ser possível realizar a troca de informações sobre o status da rede e dos canais, permitindo desta maneira operações de comunicações cooperativas entre os dispositivos [17].

1.2 IMPARIDADES DO CANAL SEM FIO

O principal objetivo das redes sem fio é realizar a transmissão de um sinal, contendo informação, de forma confiável e eficiente através do canal [18,19]. Porém em uma situação não ideal, esses sistemas estão sujeitos tanto a influências do ambiente

em que o sinal é transmitido, quanto àquelas ocasionadas pelos equipamentos que compõem as estruturas de comunicação. Consequentemente o sinal recebido pode sofrer de uma atenuação ou distorção severa, causando assim perda de informação. Tal deterioração, não pode ser completamente evitada; contudo, pode ser mitigada de forma que a mensagem transmitida seja recuperada com a menor quantidade de erros possíveis. Desta forma, para que o sistema alcance o melhor desempenho praticável em termos de confiabilidade é necessário que os efeitos dessas imparidades sejam considerados ao se modelar o canal de comunicação sem fio [18]. O canal sem fio pode estar sujeito a dois tipos principais de imparidade: (i) aditiva, como por exemplo o ruído gaussiano branco aditivo (AWGN, *Additive White Gaussian Noise*) e (ii) multiplicativa, como por exemplo o desvanecimento (ou *fading*).

1.2.1 AWGN

O ruído pode ser sobreposto (ou somado) ao sinal transmitido, sendo descrito como um fenômeno eletromagnético que varia aleatoriamente com o tempo e não carrega nenhum tipo de informação [20–22]. Além disso, o ruído AWGN pode ser proveniente tanto de fontes internas quanto externas. O ruído proveniente de fontes internas pode, em grande parte, estar relacionado a componentes internos do *hardware* do receptor que produz ruído térmico, mas também pode ser causado devido a perdas ou conexões defeituosas na antena [19,20]. Já o ruído AWGN proveniente de fontes externas provém do ambiente em que o sinal é transmitido. Além disso, o ruído é modelado como gaussiano quando trata-se de um fenômeno que é composto por uma grande quantidade de componentes independentes aleatórios, tal que pelo Teorema Central do Limite, a distribuição desse efeito pode ser caracterizada como gaussiana [4,18]. O termo branco refere-se ao fato de que o ruído é caracterizado por uma densidade espectral constante, igual a $N_0/2$, ao longo de toda a faixa de frequência como mostrado na Fig. 1 [4,18].

1.2.2 Desvanecimento

O fator preponderante no aparecimento de desvanecimento são os obstáculos que existem no percurso de propagação do sinal, ocasionando reflexões, difrações e espalhamentos. A reflexão do sinal, é ocasionada devido ao encontro deste com obstáculos que apresentam superfícies lisas com dimensões maiores que a do comprimento de onda do sinal, consequentemente são geradas múltiplas réplicas do sinal que são somadas aleatoriamente de forma construtiva ou destrutiva [18,19]. O desvanecimento pode ser dividido em dois tipos, de larga escala e de pequena escala. O desvanecimento de larga escala ocorre devido a impedimentos entre o transmissor e o receptor que possuem grande extensão quando comparados ao comprimento de onda do sinal

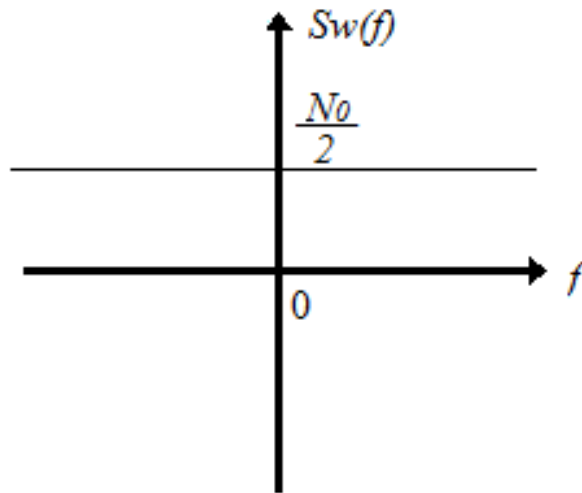


Figura 1 – Densidade espectral constante para ruído AWGN.

transmitido, como por exemplo edifícios e montanhas. O desvanecimento de larga escala, pode ser dividido em sombreamento e perda de percurso. O sombreamento é a variação aleatória do sinal devido a presença de obstáculos no trajeto entre transmissor e receptor. Já a perda de percurso caracteriza-se pela atenuação do sinal conforme este propaga-se pelo ambiente. O desvanecimento de pequena escala ocorre devido aos múltiplos percursos que o sinal transmitido percorre [18, 19]. Se durante o percurso a quantidade de obstáculos for numerosa a ponto de não permitir uma linha de visada (LoS, *Line of sight*), o desvanecimento de pequena escala pode ser nomeado como desvanecimento *Rayleigh*, pois o envoltório do sinal que será recebido pode ser descrito pela função densidade de probabilidade (PDF, *Probability Density Function*) de uma distribuição *Rayleigh* [19].

1.3 MODULAÇÃO

A modulação é o processo em que uma portadora de frequência de rádio incorpora a informação presente em um sinal para adequar ao canal, permitindo uma melhor eficiência na comunicação [19, 23]. Os procedimentos de modulação podem ser divididos em analógicos e digitais. Para o caso analógico, a modulação é aplicada continuamente no sinal analógico que contém a informação e pode ser dividida em modulação de amplitude, de frequência e de fase. Para a modulação digital, trata-se de modular a portadora analógica por meio de um sinal discreto, e os métodos podem ser PSK (*Phase-Shift Keying*), FSK (*Frequency-Shift Keying*), ASK (*Amplitude-Shift Keying*) e QSK (*Quadrature-Shift Keying*). A modulação analógica ainda é utilizada em radiodifusão AM/FM, enquanto a modulação digital é empregada na maioria dos processos de-

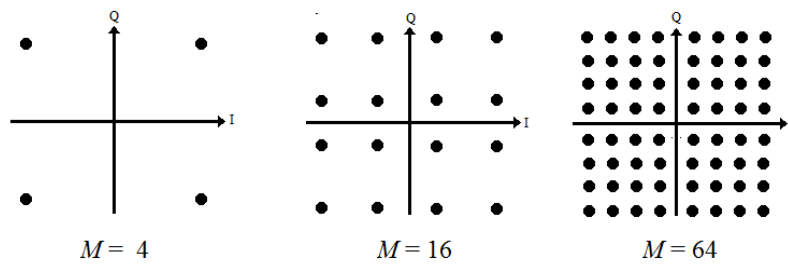


Figura 2 – Diagramas de constelações para modulações 4-QAM, 16-QAM e 64-QAM, em que o eixo das abcissas representa os componentes em fase e o eixo das coordenadas representa os componentes em quadratura.

vido as vantagens que apresenta quando comparada à primeira. Dentre as vantagens, destacam-se a menor complexidade e menor custo de implementação, maior robustez a ruídos e interferências e a possibilidade de empregar códigos corretores de erro.

1.3.1 Modulação M -QAM

A modulação digital é usada sobre a informação em formato binário, representada por 0s e 1s. Para realizar o processo é necessário que a sequência de bits de informação seja separada em grupos, afim de mapear cada grupo de bits em um símbolo de um dado alfabeto concernente ao esquema de modulação digital usado. O tamanho do alfabeto ou ordem de modulação, isto é, o número de símbolos do esquema de modulação é denotado por M [23]. Por exemplo a modulação BPSK (*Binary Phase Shift Keying*) em que $M=2$, implica que os bits de informação podem ser mapeados em dois símbolos.

A modulação em amplitude e quadratura (QAM, *Quadrature Amplitude Modulation*) é o método em que duas portadoras têm uma diferença de fase de 90° entre elas, ou seja, são ortogonais ou, equivalentemente estão em quadratura. Este tipo de modulação pode assumir valores em sistemas práticos como $M=4, 16, 64, 256$. Os esquemas de modulação podem ser representados por meio de diagramas de constelações, como apresentado na Fig. 2, para as ordens $M=4, 16$ e 64 do esquema M -QAM, em que os pontos são espaçados de forma igualitária na vertical e na horizontal e correspondem aos símbolos que podem ser assumidos por essa modulação digital.

A taxa de dados e, em consequência, a eficiência espectral aumentam conforme a ordem da modulação M aumenta, contudo, a susceptibilidade a ruídos e interferência também aumenta para um mesmo valor de potência transmitida, uma vez que os símbolos da constelação ficam mais próximos [24]. A modulação M -QAM é utilizada em diversas aplicações não apenas em sistemas de comunicação sem fio, mas também em sistemas de comunicação cabeados. Para os sistemas LTE de quarta geração, por exemplo, utiliza-se 64-QAM ou 256-QAM no *uplink*, enquanto no LTE-A utiliza-se 256-QAM

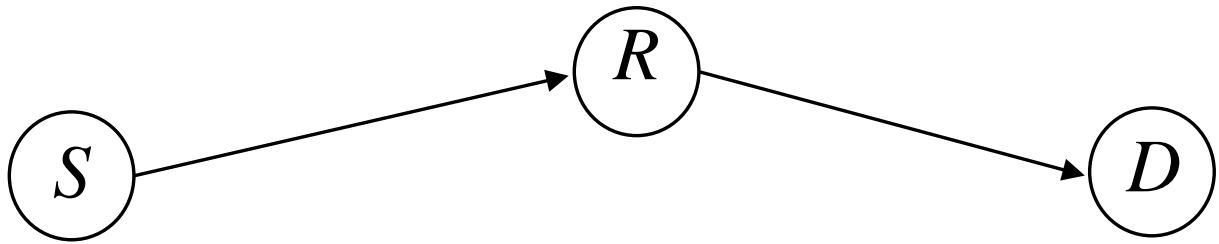


Figura 3 – Exemplo de sistema de comunicação cooperativa com dois saltos, em que uma fonte (S) comunica-se com um destino (D) através de *relay* (R).

para o *downlink*.

1.4 COMUNICAÇÃO COOPERATIVA

A técnica de comunicações cooperativas surge como uma alternativa para tecnologias como MIMO [25]. A transmissão da informação por meio da comunicação cooperativa é realizada através de dois saltos (*hops*) ou mais, diferentemente da transmissão direta em que a mensagem é enviada do transmissor ao receptor sem intermediários. Para o caso com cooperação, o *relay* (R) auxilia na transmissão da mensagem de uma dada fonte (S) a um destino (D) pretendido, por exemplo, como apresentado na Fig. 3. A fonte (S) envia a mensagem para o *relay* (R) em um primeira fase. Em uma segunda fase, o *relay* retransmite a mensagem recebida da fonte para o destino (D). Nesta situação são realizados dois saltos, o primeiro da fonte (S) para o *relay* (R), e o segundo do *relay* (R) para o destino (D).

Quando comparada com a técnica MIMO as comunicações cooperativas apresentam algumas vantagens. Por um lado, os sistemas MIMO requerem múltiplas antenas co-localizadas no transmissor e/ou no receptor, fato este que impede a implementação desta técnica em dispositivos de pequeno porte, isso se deve ao requerimento de espaçamento entre as antenas ser da ordem de metade do comprimento de onda do sinal, a fim de garantir decorrelação entre os sinais recebidos pelas mesmas e explorar desse modo a diversidade espacial obtida [26]. Outro problema enfrentado pelos sistemas MIMO é a implementação dos circuitos que são complexos, além do gasto de energia devido ao processamento de sinais [27]. Deste modo, as comunicações cooperativas surgem como uma alternativa ao prover os mesmos benefícios em termos de diversidade espacial das técnicas MIMO, e contornar essas limitações [28, 29].

Mais especificamente, a técnica de comunicações cooperativas proporciona uma diversidade espacial, conhecida como diversidade cooperativa, por meio de um arranjo virtual de antenas, constituído pelas antenas de nós vizinhos presentes na mesma rede. Consequentemente, a técnica de comunicações cooperativas possibilita um aumento da confiabilidade e da extensão das áreas de coberturas das estações base e também

lacunas causadas pelo ambiente urbano [26, 27]. Contudo, apesar das vantagens anteriormente citadas, um sistema de comunicações cooperativas, por ser um sistema baseado em comunicação sem fio, é sujeito aos efeitos dos desvanecimentos do canal. Além disso o sistema cooperativo apresenta outras desvantagens como por exemplo o aumento da interferência, que pode ocorrer devido ao aumento da capacidade ocasionado pelos *relays* causando interferências inter- e intra-celulares. Também pode ser citado como ponto negativo para a comunicação cooperativa, a necessidade de se estimar mais coeficientes de canais, pois a utilização de *relays* aumenta o número de canais sem fio .

1.4.1 Relay

O *relay* foi estudado e considerado para o processo de implementação e padronização das gerações de comunicações móveis, como o 3GPP LTE-A, no *Release 10* [30]. A operação do *relay* pode ser dividida em dois tipos diferentes de estratégias para retransmissão das mensagens: os protocolos de retransmissão transparente, no qual destaca-se o protocolo amplifica-e-encaminha (AF, *Amplify-and-Foward*) e os protocolos de retransmissão regenerativos, no qual destaca-se o protocolo decodifica-e-encaminha (DF, *Decode-and-Forward*) [28, 29, 31, 32]. Além disso, o *relay* pode operar em dois modos de retransmissão: *half duplex* (HD) e *full duplex* (FD).

1.4.2 Protocolos de Retransmissão

Como dito anteriormente os protocolos de retransmissão são divididos em dois grandes grupos, que são compostos por uma gama de métodos de retransmissão. No entanto destes destacam-se dois: amplifica-e-encaminha e decodifica-e-encaminha. Primeiramente no protocolo AF, o sinal proveniente de um nó fonte é recebido pelo *relay*, amplificado e então enviado para um nó destino. Para o protocolo DF, o procedimento difere no fato de que ao invés do sinal ser amplificado, este é decodificado e então enviado para o nó destino. Com o protocolo AF, o *relay* não causa nenhuma modificação a informação transmitida. No protocolo DF, diferentemente do protocolo anterior, a informação ou a forma de onda podem ser modificadas. Outra diferença entre estes dois protocolos reside na complexidade, o primeiro apresenta uma maior simplicidade, pois realiza apenas uma operação de amplificação ou rotação de fase, enquanto o segundo requer de *hardware* com maior complexidade para realizar operações em banda base no domínio digital. Uma característica apresentada pelo protocolo AF, e de maneira geral pelos protocolos de retransmissão transparente, é a escolha do fator de amplificação que pode ser utilizado pelo *relay*, que pode ser de ganho fixo cego (*blind*), ganho fixo semi-cego (*semi-blind*) ou ganho variável. No primeiro caso, o *relay* apenas transmite com um fator de amplificação constante independente da potência

do sinal recebido e das características do canal entre fonte e *relay*, sendo considerado subótimo quando comparado com as outras duas formas de amplificação. A amplificação de ganho fixo semi-cego, depende de dados estatísticos do canal entre fonte e *relay* sendo estas informações responsáveis por estabelecer o período no qual o *relay* irá fixar o fator de amplificação. Diferentemente do caso de ganho fixo semi-cego, na amplificação de ganho variável, o *relay* é alterado conforme as mudanças instantâneas do canal entre fonte e *relay*. Ambos os casos de ganho fixo podem sofrer efeitos de saturação devido a níveis elevados de potência de saída [32].

1.4.3 Modos de Retransmissão

Como citado anteriormente, o *relay* pode atuar em dois modos de retransmissão, o *half duplex* e o *full duplex*. A principal diferença que pode ser citada entre estes dois modos reside na forma como operam. O modo de retransmissão HD utiliza dois canais ortogonais, um para a recepção e outro para a retransmissão dos sinais, enquanto que o modo FD realiza a recepção e retransmissão de sinais simultaneamente em uma mesma frequência. Consequentemente, o modo FD consegue atingir o dobro de eficiência espectral que o modo HD. Contudo, um *relay* operando em modo *full duplex* é sujeito a auto interferência (*self interference* ou *loop interference*) provocada pelo vazamento do sinal da antena transmissora para a própria antena receptora [33].

1.5 MOTIVAÇÃO E TRABALHOS RELACIONADOS

As comunicações cooperativas surgem em um cenário em que é requerido um desempenho melhorado das redes sem fio, para atender as demandas de dados requisitada pela quantidade crescente de usuários. Deste modo têm surgido trabalhos sobre redes cooperativas, apresentando variados esquemas, cujo desempenho é avaliado em termos de diferentes métricas de desempenho, tais como a probabilidade de erro de bit e a probabilidade de *outage*. Primeiramente em [29], foram apresentados esquemas de seleção de *relay* para redes cooperativas *ad hoc* (isto é, redes não infraestruturadas), comparando os diferentes critérios de seleção do nó *relay*, assim como mostrando as vantagens e desvantagens. Em [33] realizou-se um estudo que avalia o desempenho de rede cooperativa, considerando um *relay* que opera por meio de uma técnica de retransmissão híbrida entre os modos HD e FD. Em [34], foi apresentado um esquema de transmissão adaptativa, utilizando um *relay* do tipo DF cognitivo. Em [35], realizou-se um estudo acerca do desempenho de *outage* para redes cooperativas, considerando um FD-AF. Em [36], foram analisados diferentes protocolos que exploram a diversidade espacial, caracterizando o desempenho de *outage*. Por fim, em [28], foi realizado um estudo acerca do desempenho de um sistema de comunicação cooperativa com modulação binária para canais com desvanecimento Nakagami-*m*. Neste

trabalho optou-se por realizar um estudo do desempenho, por meio da probabilidade de erro de bit (BER, *Bit Error Rate*), para uma rede cooperativa que consiste de um *relay* do tipo HD-AF, considerando os esquemas de modulação BPSK e M-QAM. Além disso, uma comparação do desempenho com sistemas não cooperativos (ou seja, aqueles que transmitem informação diretamente pelo enlace entre fonte e destino, sem uso de *relays*) é realizado.

1.6 CONTRIBUIÇÕES E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A proposta do trabalho é avaliar o desempenho de redes cooperativas através da probabilidade de erro de bit para os esquemas de modulação BPSK e M-QAM. Deste modo, as principais contribuições deste trabalho são as seguintes:

- Foram implementadas rotinas numéricas de simulação baseadas no método de Monte Carlo, as quais podem ser utilizadas como referência ou base para trabalhos futuros que envolvam outras técnicas de transmissão, tais como códigos corretores de erro, múltiplas antenas, OFDM.
- Os cenários avaliados consideram canais sujeitos a ruído do tipo AWGN e desvanecimento em sistemas de transmissão direta e cooperativa.

O trabalho está organizado em capítulos, sendo que no Capítulo 2 é apresentado o modelo de sistema considerado, assim como as expressões utilizadas para a elaboração das rotinas de simulação. No Capítulo 3 são apresentadas as expressões analíticas utilizadas para validar os resultados obtidos através das simulações. No Capítulo 4, os resultados obtidos são apresentados por meio de curvas, de desempenho em termos da BER, assim como uma discussão sobre os mesmos é elaborada.

2 MODELO DO SISTEMA

Neste trabalho, considera-se um sistema de comunicação cooperativa com retransmissão HD, conforme apresentado na Fig. 4 (a), em que um nó fonte (S) comunica-se com um nó destino (D) por meio de um nó *relay* (R) localizado entre ambos. O desempenho do sistema de comunicação cooperativa é comparado com um sistema de transmissão direta, conforme apresentado na Fig. 4 (b). Os nós dos sistemas são providos de uma única antena e operam de acordo com um esquema de acesso múltiplo por divisão de tempo (TDMA, *Time Division Multiple Access*). Além disso, considera-se que os nós são sujeitos a ruído AWGN de potência N , modelado como uma variável aleatória Gaussiana complexa e circularmente simétrica, $n \sim \mathcal{CN}(0, N)$. Assim sendo, os componentes em fase e quadratura são variáveis aleatórias Gaussianas independentes e identicamente distribuídas (i.i.d) de média 0 e variância $N/2$.

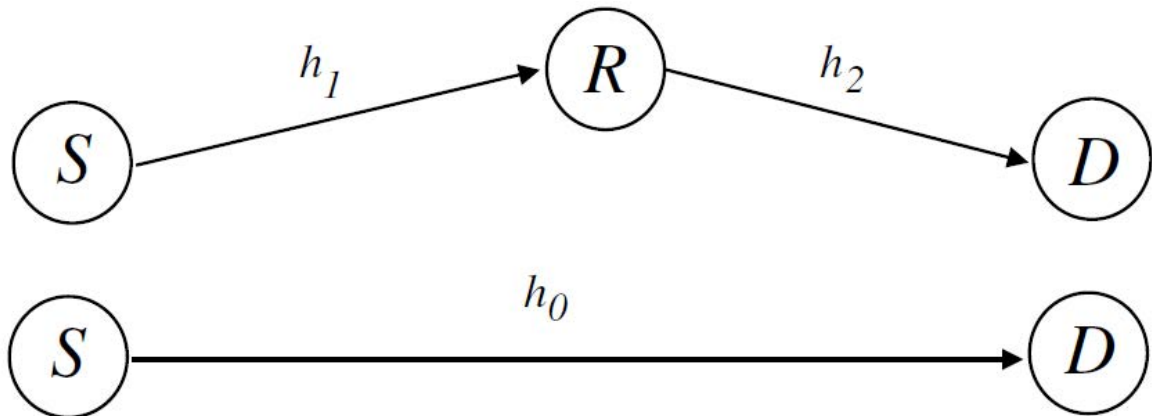


Figura 4 – (a) Transmissão entre fonte (S) e destino (D) através de dois saltos, por meio de um *relay* (R) operando sob o protocolo AF. (b) Sistema de transmissão direta, em que uma fonte (S) se comunica com um destino (D).

Admite-se que os coeficientes de canal entre os nós fonte e *relay* e entre os nós *relay* e destino, h_1 e h_2 , respectivamente são sujeitos a desvanecimento do tipo *Rayleigh*. Estes coeficientes de canal são modelados como variáveis aleatórias complexas, circularmente simétricas, independentes e não identicamente distribuídas, ou seja, $h_i \sim \mathcal{CN}(0, \Omega_i)$, para $i \in \{1, 2\}$, sendo que $\Omega_i = E[|h_i|^2] = d_i^{-\alpha}$, em que $E[\cdot]$ é a esperança matemática, d_1 e d_2 são as distâncias entre os nós fonte e *relay* e entre os nós *relay* e destino, respectivamente, e α é o expoente de perda de percurso. O desvanecimento é modelado de acordo com a função densidade de probabilidade (PDF) do tipo *Rayleigh*, dada

por

$$f_{|h_i|}(x) = \frac{2x}{\Omega} e^{-\frac{x^2}{\Omega}}, x \geq 0. \quad (2.1)$$

A distribuição de *Rayleigh*, como apresentada na Fig. 5 é uma distribuição de probabilidade contínua para variáveis aleatórias de valores positivos.

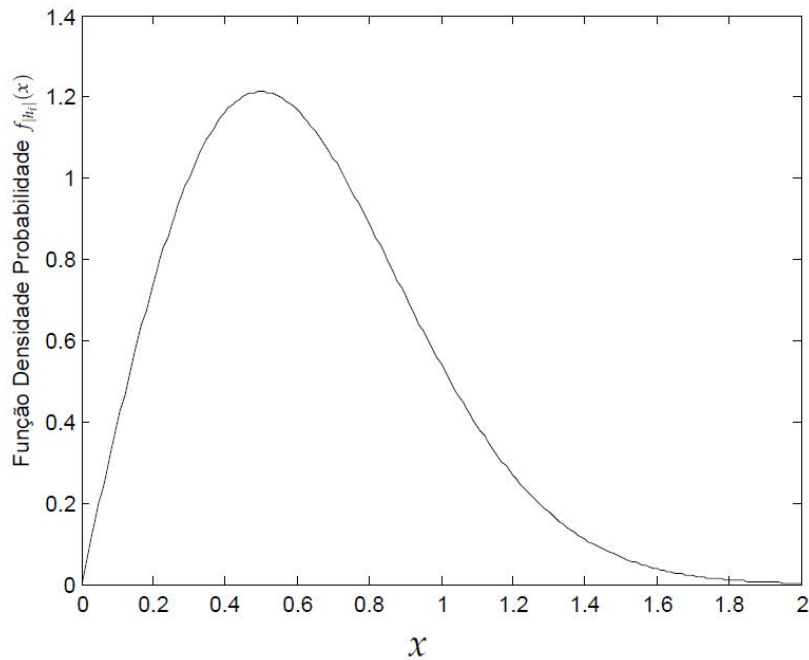


Figura 5 – Distribuição de *Rayleigh* para $\Omega = 0.5$.

A relação sinal ruído (SNR, *signal-to-noise ratio*) transmitida do sistema denota-se por P_S/N , em que P_S representa a potência transmitida pela fonte.

2.1 FATOR DE DISTÂNCIA DE SÍMBOLO c

O fator de distância de símbolo representa a distância entre os símbolos para uma dada modulação, em função da potência transmitida pela fonte. A seguir serão apresentadas as expressões para o fator de distância de símbolo c para as modulações BPSK e M-QAM.

2.1.1 BPSK

Para o esquema de modulação BPSK, considerando que os símbolos são equiprováveis, o fator de distância entre símbolos, denotado por c e ilustrado na Fig. 6 pode ser obtido como [38]

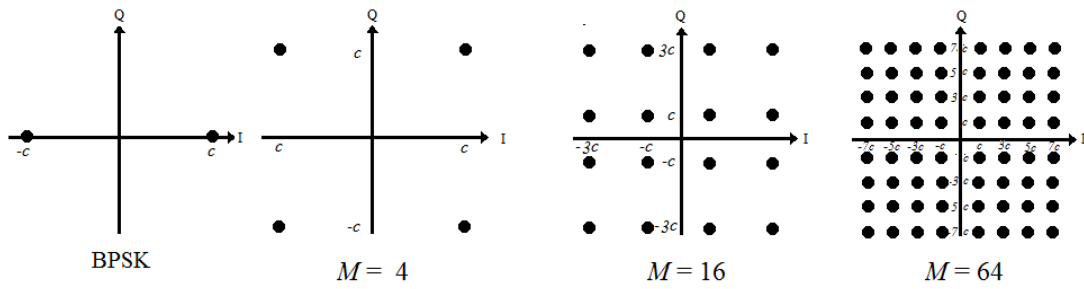


Figura 6 – Diagramas de constelações para os esquemas BPSK e M -QAM com a representação do fator de distância entre símbolos c , em que o eixo das abcissas representa os componentes em fase e o eixo das coordenadas representa os componentes em quadratura.

$$\begin{aligned}
 E[|x|^2] &= \frac{1}{2}c_{BPSK}^2 + \frac{1}{2}(-c_{BPSK})^2 \\
 &= c_{BPSK}^2.
 \end{aligned}
 \tag{2.2}$$

Dado que, por definição, $E[|x|^2] = P_S$, segue que o fator distância de símbolo para a modulação BPSK pode ser obtida como

$$c_{BPSK} = \sqrt{P_S}. \tag{2.3}$$

2.1.2 M -QAM

Para o esquema de modulação M -QAM, em que M é a ordem de modulação, tem-se que o fator de distância entre símbolos c é dado por [38]

$$\begin{aligned}
 E[|x|^2] &= \sum_{m=0}^{L-1} c_{M-QAM}^2 (-L + 1 + 2m)^2 \\
 &= \frac{2}{3}c_{M-QAM}^2 (L^2 - 1), \\
 &= \frac{2}{3}c_{M-QAM}^2 (M - 1),
 \end{aligned}$$

em que na expressão anterior considerou-se que $M = L^2$. Portanto, segue que a distância de símbolo pode ser obtida como

$$c_{M-QAM} = \sqrt{\frac{3}{2} \frac{P_S}{(M - 1)}}. \tag{2.4}$$

As expressões obtidas para o fator de símbolo foram utilizadas posteriormente nas rotinas numéricas. Considera-se para este trabalho sistemas de transmissão direta, em que o nó fonte comunica-se diretamente com o nó destino, e sistemas cooperativos, em que o nó fonte comunica-se com o nó destino através de um nó *relay*.

2.2 TRANSMISSÃO DIRETA

Para o sistema de transmissão direta, como apresentado na Fig. 4 (b), em cenário de canais AWGN, o sinal recebido é representado como $y=x + n_0$, sendo que n_0 é o ruído AWGN no receptor do destino e x é o sinal proveniente da fonte. Para o sistema de transmissão direta em cenários de canais com desvanecimento, o sinal recebido é representado como $y=h_0x + n_0$, sendo que h_0 é o coeficiente de canal entre fonte e destino.

2.3 SISTEMA COOPERATIVO

Para o sistema cooperativo, como apresentado na Fig. 4 (a), tem-se que a propagação do sinal é realizada em dois saltos, sendo o primeiro realizado entre fonte e *relay* e o segundo entre *relay* e destino. Deste modo, para o cenário com AWGN, representa-se o sinal recebido pelo *relay* como $y_R=x + n_1$, sendo que n_1 é o ruído AWGN presente no receptor do *relay*. Este opera por meio do protocolo AF, deste modo o sinal recebido é amplificado por um fator β , dado por [33]

$$\beta = \sqrt{\frac{P_R \Omega_2}{P_S \Omega_1 + \sigma^2}}, \quad (2.5)$$

em que P_R é a potência transmitida no *relay* e σ^2 é a variância do ruído AWGN. Sendo assim, o sinal enviado no segundo salto e recebido no destino é representado como

$$y_D = \beta y_R + n_2, \quad (2.6)$$

em que n_2 é o ruído AWGN presente no destino. Para o cenário de desvanecimento o sinal recebido pelo *relay* pode ser expresso como $y_R=h_1x + n_1$, em que h_1 é coeficiente de canal do enlace entre fonte e *relay* (primeiro salto). Para este cenário o fator que amplifica o sinal, é dado por [33]

$$\beta = \sqrt{\frac{P_R}{P_S |h_1|^2 + N}}. \quad (2.7)$$

Por fim, o sinal recebido no destino é representado por

$$y_D = \omega^*(h_2\beta y_R + n_2), \quad (2.8)$$

em que ω^* denota o conjugado de $\omega = \frac{h_1 h_2}{|h_1 h_2|^2}$ e h_2 é o coeficiente de canal do enlace entre *relay* e destino (segundo salto).

3 PROBABILIDADE DE ERRO DE BIT (BER)

Neste capítulo serão apresentadas as expressões analíticas da BER para os sistemas de transmissão direta e comunicação cooperativa, para os esquemas de modulação BPSK e M -QAM. As demais modulações PSK não foram avaliadas devido a dois motivos. O primeiro motivo deve-se ao fato de que as modulações BPSK e M -QAM são utilizadas em sistemas sem fio. O outro motivo deve-se ao fato de que a eficiência espectral da modulação BPSK é maior do que a das outras modulações PSK. Por causa dos dois motivos citados anteriormente foram escolhidas as modulações BPSK e M -QAM. A avaliação da BER foi realizada através de simulações numéricas de Monte Carlo. Os resultados obtidos foram confrontados com as expressões analíticas apresentadas a seguir.

3.1 CANAL AWGN

3.1.1 BPSK

Para o esquema de modulação BPSK, a expressão da probabilidade de erro de bit é dada por [37, Eq. (5.2.4)]

$$P_{b,\text{BPSK}}(\gamma_{e2e}) = Q(\sqrt{\gamma_{e2e}}), \quad (3.1)$$

em que $Q(\cdot)$ é a função Q, dada por [20, Eq.B.1]

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du, \quad (3.2)$$

e γ_{e2e} é a SNR recebida fim-a-fim do sistema em questão. Para o sistema de transmissão direta, γ_{e2e} é dada por

$$\gamma_{e2e} = \gamma_0, \quad (3.3)$$

em que $\gamma_0 = P_S/N$ é SNR recebida no enlace entre fonte e destino. Para o sistema cooperativo, γ_{e2e} é dado por

$$\gamma_{e2e} = \frac{\gamma_1 \gamma_2}{\gamma_1 + \gamma_2 + 1}, \quad (3.4)$$

em que $\gamma_1 = P_S/N$ e $\gamma_2 = P_R/N$ são as SNRs recebidas no primeiro salto e segundo salto, respectivamente.

3.1.2 M-QAM

Considerando um sistema com modulação M-QAM mapeado por codificação de Gray, tal que os símbolos vizinhos diferem apenas por um bit, e para o regime de alta SNR, a expressão da probabilidade de erro de bit é aproximada por [38, Eq. (5.119)]

$$P_{b,\text{QAM}}(\gamma_{e2e}) \approx \frac{P_s(\gamma_{e2e})}{\log_2(M)}, \quad (3.5)$$

em que $\log_2 M$ é quantidade de bits por símbolo e P_s é a expressão para probabilidade de erro de símbolo dos esquemas M-QAM, dada por [38, Eq. (5.113)]

$$P_s(\gamma_{e2e}) = 4 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right) Q \left(\sqrt{\frac{3\gamma_{e2e}}{M-1}}\right) - 4 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right) Q^2 \left(\sqrt{\frac{3\gamma_{e2e}}{M-1}}\right). \quad (3.6)$$

De (3.6), para valores de alta SNR, o segundo termo da expressão é considerado desprezível. Desta maneira, a expressão da BER para um esquema de modulação M-QAM pode ser simplificada como

$$P_{b,\text{QAM}}(\gamma_{e2e}) \approx \frac{4}{\log_2(M)} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right) Q \left(\sqrt{\frac{3\gamma_{e2e}}{M-1}}\right). \quad (3.7)$$

Para o sistema de transmissão direta com modulação M-QAM, γ_{e2e} é dada por 3.3. Já para o sistema cooperativo, γ_{e2e} é dado por 3.4.

3.2 CANAL DE DESVANECIMENTO

3.2.1 BPSK

A expressão da BER para o esquema de modulação BPSK em um cenário de desvanecimento *Rayleigh* para um sistema de transmissão direta é dada por [37, Eq. (14.3.7)]

$$P_{b,\text{BPSK}}(\gamma_{e2e}) = \frac{1}{2} (1 - \sqrt{\gamma_{e2e}}), \quad (3.8)$$

em que $\gamma_{e2e} = \frac{\gamma_0}{\gamma_0+2}$ e $\gamma_0 = |h_0|^2 P_S/N$.

Para o sistema cooperativo sujeito a desvanecimento, a expressão analítica da BER é dada por [28]

$$P_{b,\text{BPSK}} = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} Q\left(\sqrt{\frac{xy}{x+y+1}}\right) f_{\gamma_1}(x) f_{\gamma_2}(y) dx dy, \quad (3.9)$$

em que $f_{\gamma_1}(\cdot)$ e $f_{\gamma_2}(\cdot)$ são as PDFs das SNRs recebidas, $\gamma_1 = |h_1|^2 P_S / N$ e $\gamma_2 = |h_2|^2 P_R / N$, sendo variáveis aleatórias com distribuição exponencial. Portanto, tem-se que

$$f_{\gamma_1}(x) = \frac{1}{\bar{\gamma}_1} e^{-\frac{x}{\bar{\gamma}_1}}, \quad (3.10)$$

$$f_{\gamma_2}(y) = \frac{1}{\bar{\gamma}_2} e^{-\frac{y}{\bar{\gamma}_2}}, \quad (3.11)$$

em que $\bar{\gamma}_1 = P_S \Omega_1 / N$ e $\bar{\gamma}_2 = P_R \Omega_2 / N$.

3.2.2 M-QAM

Para o cenário de desvanecimento, a BER para o sistema de transmissão direta é obtida através de (3.7), sendo dada por

$$P_{b,\text{QAM}} \approx \frac{4\left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right)}{\log_2(M)} \int_0^{\infty} Q\left(\sqrt{\frac{3z}{M-1}}\right) f_{\gamma_0}(z) dz. \quad (3.12)$$

Finalmente, para o sistema cooperativo a BER é obtida através de (3.7), sendo dada por

$$P_{b,\text{QAM}} \approx \frac{4\left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right)}{\log_2(M)} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} Q\left(\sqrt{\frac{3}{M-1} \left(\frac{xy}{x+y+1}\right)}\right) f_{\gamma_1}(x) f_{\gamma_2}(y) dx dy. \quad (3.13)$$

As equações apresentadas ao longo deste capítulo foram utilizadas para validar os resultados das simulações numéricas, ou seja, garantir que as rotinas numéricas implementadas estavam apresentando valores coerentes.

4 RESULTADOS NUMÉRICOS

Primeiramente deve-se ressaltar que as simulações de Monte Carlo foram realizadas com 1×10^6 iterações. Esta quantidade mostrou-se suficiente para se obter os resultados esperados. Os parâmetros utilizados nas rotinas numéricas e os seus respectivos valores são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1- Parâmetros utilizados nas Rotinas numéricas.

Parâmetros	Valor
Intervalo de SNR	-10 a 50 dB
Expoente de perda de percurso	$\alpha = 4$
Distância normalizada fonte-destino	$d_0 = 1$
Distância normalizada fonte-relay	$d_1 = 0,5$
Distância normalizada relay-destino	$d_2 = 0,5$
Ganho médio do canal fonte-relay	$\Omega_1 = d_1^{-\alpha}$
Ganho médio do canal relay-destino	$\Omega_2 = d_2^{-\alpha}$

Como apresentado anteriormente, considerou-se que $\alpha = 4$, que as distâncias dos enlaces fonte-destino, fonte-relay e relay-destino foram normalizadas, tal que, $d_0 = 1$, $d_1 = 0,5$ e $d_2 = 0,5$ respectivamente. A seguir serão apresentados as rotinas de simulação em pseudocódigo para os cenários de canais AWGN e desvanecimento para o sistema de transmissão direta.

Algoritmo 1: Rotina numérica para canal AWGN em sistema de transmissão direta.

```
1 Entradas:
2 vetor de valores,  $snr_{db}$ ;
3 quantidade iterações,  $k$ ;
4 ordem de modulação,  $M$ 
5 Saída:
6 probabilidade de erro de bit,  $P_b$ 
7 início
8   Geração de vetor de dados binários equiprováveis (0s e 1s),  $dados_{tx}$  ;
9   for  $i \in SNR$  transmitida do
10     Cálculo da potência de ruído AWGN,  $N$ ;
11     Cálculo do desvio padrão para ruído AWGN,  $\sigma$  ;
12     Cálculo da potência transmitida para uma dada SNR,  $P_S$ ;
13     Cálculo do fator de distância entre símbolos conforme modulação
14     utilizada (BPSK ou  $M$ -QAM),  $c$ ;
15     Modulação de  $dados_{tx}$  através de mapeamento de dados binários para
16     símbolos;
17     Geração do vetor ruído AWGN,  $n_0$ ;
18     Cálculo do sinal recebido,  $y$ ;
19     Demodulação do sinal,  $d$ ;
20     Decodificação do sinal recebido,  $dados_{rx}$ ;
21     Cálculo da quantidade de erros entre  $dados_{rx}$  e  $dados_{tx}$ ;
22     Cálculo da probabilidade de erro de bit,  $P_b$ ;
23   end
24 fim
```

Assim como os Algoritmos 1 e 2 foram apresentadas para o sistema de transmissão direta, também são apresentadas para o sistema cooperativo, os Algoritmos 3 e 4, que são respectivamente para os cenários AWGN e desvanecimento.

As simulações foram validadas pelas expressões analíticas apresentadas no Capítulo 3. Para os sistemas considerou-se um intervalo de valores de SNR de -10 a 50 dB. Observando-se os resultados obtidos, pode-se afirmar primeiramente que as simulações elaboradas estão em acordo com o as expressões analíticas, validando assim as rotinas implementadas. Primeiramente, a Fig. 7 apresenta os resultados da BER em função da SNR transmitida para os sistemas de transmissão direta e comunicação cooperativa para um canal AWGN para a modulação BPSK. Para a obtenção dos resultados para transmissão direta foi utilizada uma rotina numérica semelhante ao apresentada no Algoritmo 1 e para obtenção dos resultados para a comunicação cooperativa foi utilizada uma rotina numérica semelhante ao apresentada no Algoritmo 3. Além

Algoritmo 2: Rotina numérica para canal com desvanecimento em sistema de transmissão direta.

```
1 Entradas:
2 vetor de valores,  $snr_{db}$ ;
3 quantidade iterações,  $k$ ;
4 ordem de modulação,  $M$ 
5 Saída:
6 probabilidade de erro de bit,  $P_b$ 
7 início
8   Geração de vetor de dados binários equiprováveis (0s e 1s),  $dados_{tx}$  ;
9   for  $i \in SNR$  transmitida do
10     Cálculo da potência de ruído AWGN,  $N$ ;
11     Cálculo do desvio padrão para ruído AWGN,  $\sigma$  ;
12     Cálculo da potência transmitida para uma dada SNR,  $P_S$ ;
13     Cálculo do fator de distância entre símbolos conforme modulação
14     utilizada (BPSK ou  $M$ -QAM),  $c$ ;
15     Modulação de  $dados_{tx}$  através de mapeamento de dados binários para
16     símbolos;
17     Geração do vetor coeficiente de canal,  $h_0$ ;
18     Geração do vetor ruído AWGN,  $n_0$ ;
19     Cálculo do sinal recebido,  $y$ ;
20     Demodulação do sinal,  $d$ ;
21     Decodificação do sinal recebido,  $dados_{rx}$ ;
22     Cálculo da quantidade de erros entre  $dados_{rx}$  e  $dados_{tx}$ ;
23     Cálculo da probabilidade de erro de bit,  $P_b$ ;
24   end
25 fim
```

disso, o cálculo do fator de distância foi realizado através de (2.3). Nota-se que os resultados numéricos estão coerentes com as expressões analíticas apresentadas no Capítulo 3. Também é possível perceber que para uma mesma potência transmitida do sistema, a curva de sistema cooperativo tem um desempenho melhor que aquele de transmissão direta. Isto deve-se ao fato de que o esquema de retransmissão mitiga os efeitos gerados pelo ruído.

A Fig. 8 apresenta os resultados da BER em função da SNR transmitida para os sistemas de transmissão direta e comunicação cooperativa para um canal AWGN para a modulação 4-QAM. Para a obtenção dos resultados para transmissão direta foi utilizada uma rotina numérica semelhante ao apresentada no Algoritmo 1 e para obtenção dos resultados para a comunicação cooperativa foi utilizada uma rotina numérica semelhante ao apresentada no Algoritmo 3. Além disso, o cálculo do fator de distância foi realizado através de (2.4). Nota-se que os resultados são iguais aos apresentados na Fig. 7, pois os esquemas de modulação BPSK e 4-QAM têm o mesmo desempenho. Os resultados iguais devem-se ao fato de que, apesar dos esquemas de modulação BPSK e 4-QAM serem diferentes ambos apresentam a mesma expressão da probabilidade de

Algoritmo 3: Rotina numérica para canal AWGN em sistema cooperativo.

```
1 Entradas:
2 vetor de valores,  $snr_{db}$ ;
3 quantidade iterações,  $k$ ;
4 ordem de modulação,  $M$ ;
5 expoente de perda de percurso,  $\alpha$ 
6 Saída:
7 probabilidade de erro de bit,  $P_b$ 
8 início
9   Geração de vetor de dados binários equiprováveis (0s e 1s),  $dados_{tx}$  ;
10  for  $i \in SNR$  transmitida do
11    Cálculo da potência de ruído AWGN,  $N$ ;
12    Cálculo do desvio padrão de ruído AWGN,  $\sigma$  ;
13    Cálculo da potência transmitida pela fonte, para uma dada SNR ,  $P_S$ ;
14    Cálculo da potência transmitida pelo relay, para uma dada SNR ,  $P_R$ ;
15    Cálculo do ganho médio do canal do primeiro salto,  $\omega_1$ ;
16    Cálculo do ganho médio do canal do segundo salto,  $\omega_2$ ;
17    Cálculo do fator de distância entre símbolos conforme modulação
      utilizada (BPSK ou  $M$ -QAM),  $c$ ;
18    Modulação de  $dados_{tx}$  através de mapeamento de dados binários para
      símbolos;
19    Geração do vetor ruído AWGN no relay,  $n_1$ ;
20    Cálculo do sinal recebido pelo relay,  $y_R$ ;
21    Geração do fator de amplificação,  $\beta$ ;
22    Geração do vetor ruído AWGN no destino,  $n_2$ ;
23    Cálculo do sinal recebido pelo nó destino,  $y_D$ ;
24    Demodulação do sinal,  $d$ ;
25    Decodificação do sinal recebido,  $dados_{rx}$ ;
26    Cálculo da quantidade de erros entre  $dados_{rx}$  e  $dados_{tx}$ ;
27    Cálculo da probabilidade de erro de bit,  $P_b$ ;
28  end
29 fim
```

erro de bit.

Algoritmo 4: Rotina numérica para canal com desvanecimento em sistema cooperativo.

```
1 Entradas:
2 vetor de valores,  $snr_{db}$ ;
3 quantidade iterações,  $k$ ;
4 ordem de modulação,  $M$ ;
5 expoente de perda de percurso,  $\alpha$ 
6 Saída:
7 probabilidade de erro de bit,  $P_b$ 
8 início
9   Geração de vetor de dados binários equiprováveis (0s e 1s),  $dados_{tx}$  ;
10  for  $i \in SNR$  transmitida do
11    Cálculo da potência de ruído AWGN,  $N$ ;
12    Cálculo do desvio padrão do ruído AWGN,  $\sigma$  ;
13    Cálculo da potência transmitida pela fonte para uma dada SNR ,  $P_S$ ;
14    Cálculo da potência transmitida pelo relay para uma dada SNR ,  $P_R$ ;
15    Cálculo do ganho médio do canal do primeiro salto,  $\omega_1$ ;
16    Cálculo do ganho médio do canal do segundo salto,  $\omega_2$ ;
17    Cálculo do fator de distância entre símbolos conforme modulação
    utilizada (BPSK ou  $M$ -QAM),  $c$ ;
18    Modulação de  $dados_{tx}$  através de mapeamento de dados binários para
    símbolos;
19    Geração do vetor ruído AWGN no relay,  $n_1$ ;
20    Geração do vetor coeficiente de canal do primeiro salto,  $h_1$ ;
21    Cálculo do sinal recebido pelo relay,  $y_R$ ;
22    Geração do fator de amplificação,  $\beta$ ;
23    Geração do vetor ruído AWGN no destino,  $n_2$ ;
24    Geração vetor coeficiente de canal do segundo salto,  $h_2$ ;
25    Cálculo do sinal recebido pelo nó destino,  $y_D$ ;
26    Demodulação do sinal,  $d$ ;
27    Decodificação do sinal recebido,  $dados_{rx}$ ;
28    Cálculo da quantidade de erros entre  $dados_{rx}$  e  $dados_{tx}$ ;
29    Cálculo da probabilidade de erro de bit,  $P_b$ ;
30  end
31 fim
```

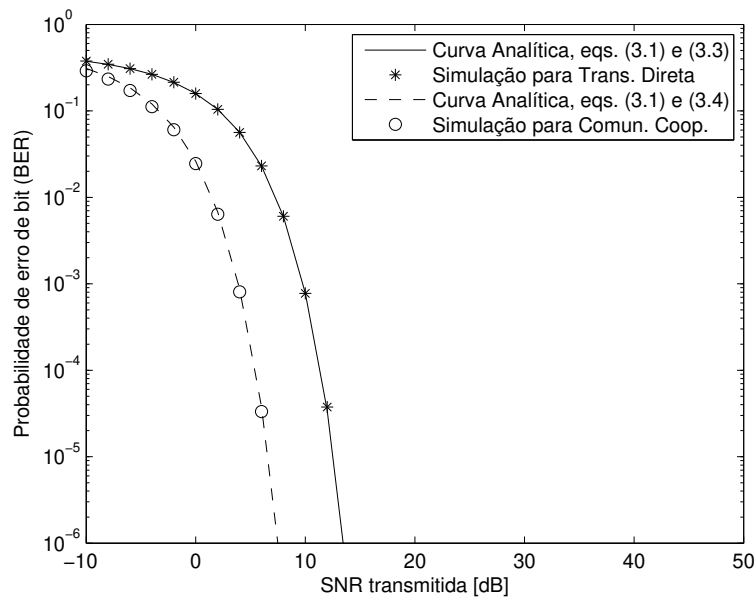


Figura 7 – BER vs. SNR transmitida em canais AWGN, considerando sistemas de transmissão direta e cooperativo, para o esquema de modulação BPSK.

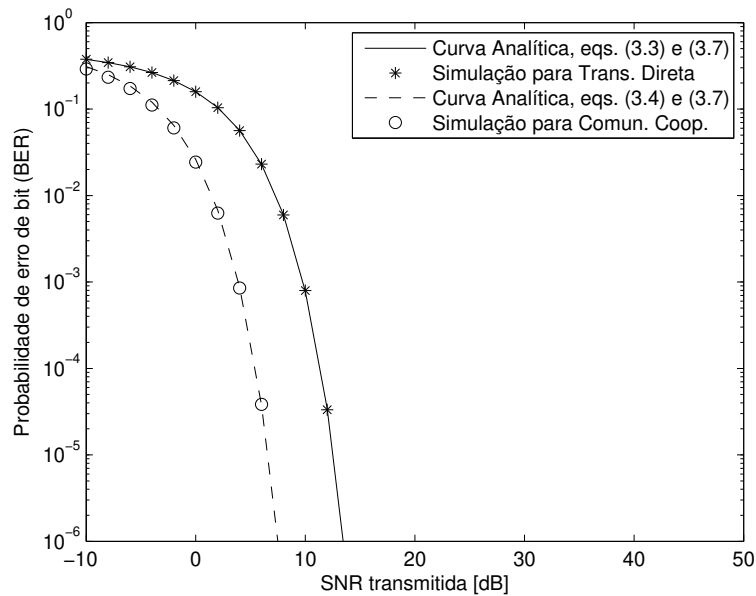


Figura 8 – BER vs. SNR transmitida em canais AWGN, considerando sistemas de transmissão direta e cooperativo, para o esquema de modulação 4-QAM.

A Fig. 9 apresenta os resultados da BER em função da SNR transmitida para os sistemas de transmissão direta e comunicação cooperativa para um canal AWGN para a modulação 16-QAM. Para a obtenção dos resultados para transmissão direta foi utilizada uma rotina numérica semelhante ao apresentada no Algoritmo 1 e para obtenção dos resultados para a comunicação cooperativa foi utilizada uma rotina numérica se-

melhante ao apresentada no Algoritmo 3. Além disso, o cálculo do fator de distância foi realizado através de (2.4). Percebe-se que os resultados são similares àqueles da Fig. 8, contudo é possível notar dois acontecimentos, em primeiro lugar, que existe uma pequena diferença entre as curvas analíticas e os resultados das simulações, isto se deve ao fato de que a aproximação em (3.7) apresenta valores apropriados para o regime de alta SNR. Porém para o regime de baixa SNR ocorre a discrepância entre as curvas. Em segundo lugar, nota-se que as curvas sofreram um deslocamento para direita, o que implica uma deterioração de desempenho. Tal acontecimento ocorre, pois para a modulação de 16-QAM, os símbolos estão mais próximos quando comparada com a modulação de 4-QAM, para uma mesma potência transmitida.

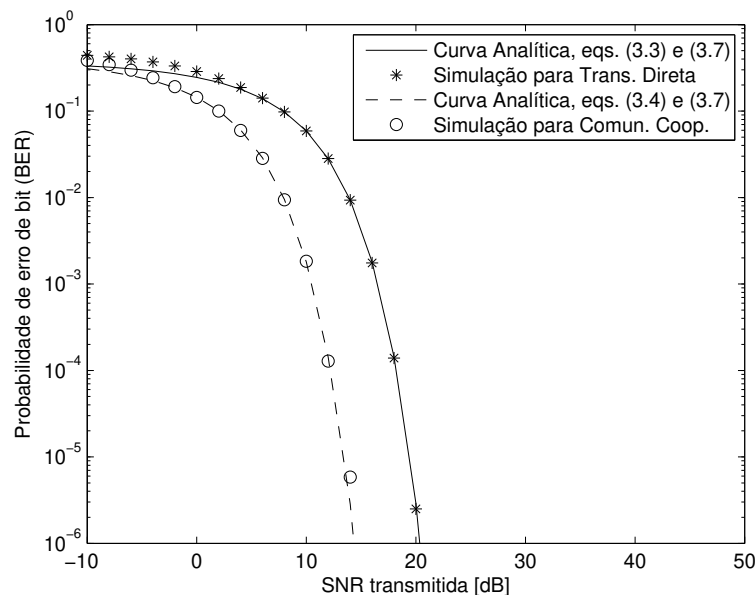


Figura 9 – BER vs. SNR transmitida em canais AWGN, considerando sistemas de transmissão direta e cooperativo, para o esquema de modulação 16-QAM.

Na Fig. 10 apresentam-se os resultados da BER em função da SNR transmitida para os sistemas de transmissão direta e comunicação cooperativa para um canal AWGN para a modulação 64-QAM. Para a obtenção dos resultados para transmissão direta foi utilizada uma rotina numérica semelhante ao apresentada no Algoritmo 1 e para obtenção dos resultados para a comunicação cooperativa foi utilizada uma rotina numérica semelhante ao apresentada no Algoritmo 3. Além disso, o cálculo do fator de distância foi realizado através de (2.4). Nota-se que o comportamento das curvas é similar ao apresentado nas Figs. 8 e 9, porém a diferença, na região de baixa SNR, entre as curvas analíticas e os resultados das simulações aumenta quando comparada com a Fig. 9. Tal acontecimento deve-se ao fato de que a aproximação em (3.7) apresenta valores apropriados para o regime de alta SNR. Porém para o regime de baixa SNR

ocorre a discrepância entre as curvas. Também nota-se uma deterioração de desempenho quando comparado àquele dos esquemas 4-QAM e 16-QAM, como esperado.

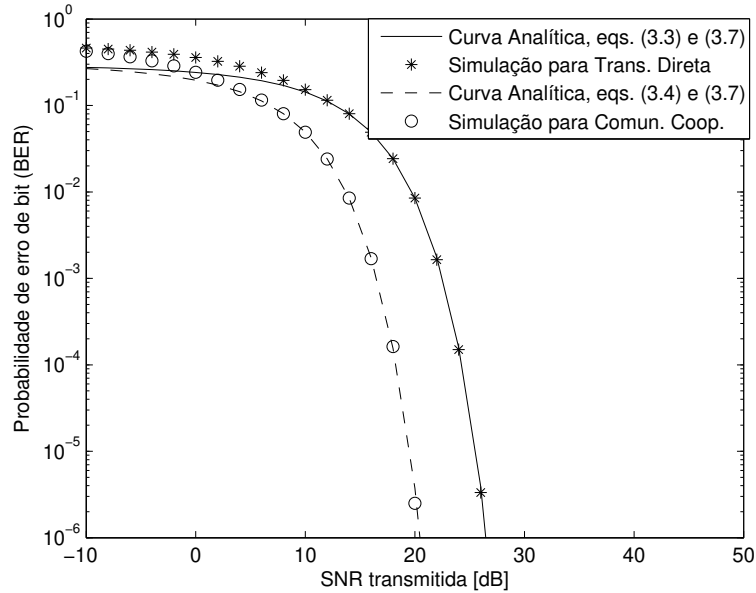


Figura 10 – BER vs. SNR transmitida em canais AWGN, considerando sistemas de transmissão direta e cooperativo, para o esquema de modulação 64-QAM.

No canal com desvanecimento para as modulações BPSK e *M*-QAM, é possível perceber que as curvas, das Figs. 11 a 14, apresentam um desempenho inferior quando comparadas com as curvas em canais AWGN, mostradas nas Figs. 7 a 10. A Fig. 11 apresenta os resultados da BER em função da SNR transmitida para os sistemas de transmissão direta e comunicação cooperativa para um canal com desvanecimento para a modulação BPSK. Para a obtenção dos resultados para transmissão direta foi utilizada uma rotina numérica semelhante ao apresentada no Algoritmo 2 e para obtenção dos resultados para a comunicação cooperativa foi utilizada uma rotina numérica semelhante ao apresentada no Algoritmo 4. Além disso, o cálculo do fator de distância foi realizado através de (2.3). Nota-se na figura que o sistema cooperativo apresenta um desempenho superior ao do sistema de transmissão direta, ou seja para um mesmo valor de SNR, a probabilidade de erro de bit é menor, mostrando assim que o sistema cooperativo consegue mitigar os efeitos do desvanecimento.

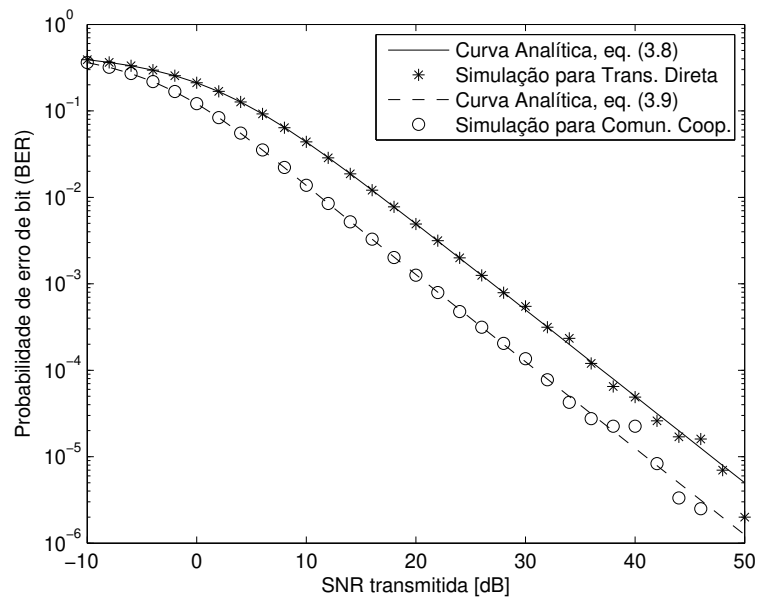


Figura 11 – BER vs. SNR transmitida em canais com desvanecimento, considerando sistemas de transmissão direta e cooperativo, para o esquema de modulação BPSK.

A Fig. 12 apresenta os resultados da BER em função da SNR transmitida para os sistemas de transmissão direta e comunicação cooperativa para um canal com desvanecimento para a modulação 4-QAM. Para a obtenção dos resultados para transmissão direta foi utilizada uma rotina numérica semelhante ao apresentada no Algoritmo 2 e para obtenção dos resultados para a comunicação cooperativa foi utilizada uma rotina numérica semelhante ao apresentada no Algoritmo 4. Além disso, o cálculo do fator de distância foi realizado através de (2.4). Nota-se que os resultados são iguais aos apresentados na Fig. 11, isto deve-se também ao fato dos esquemas de modulação BPSK e 4-QAM possuírem a mesma expressão para probabilidade de erro de bit.

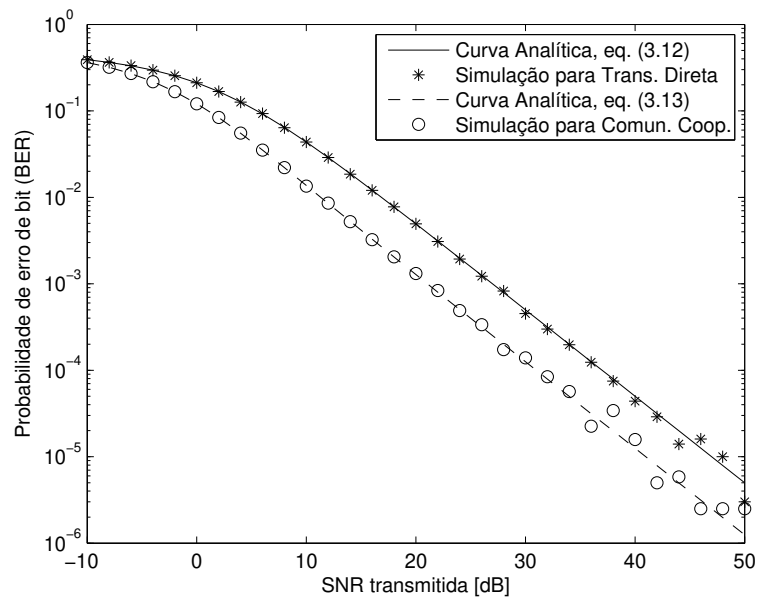


Figura 12 – BER vs. SNR transmitida em canais com desvanecimento, considerando sistemas de transmissão direta e cooperativo, para o esquema de modulação 4-QAM.

A Fig. 13 apresenta os resultados da BER em função da SNR transmitida para os sistemas de transmissão direta e comunicação cooperativa para um canal com desvanecimento para a modulação 16-QAM. Para a obtenção dos resultados para transmissão direta foi utilizada uma rotina numérica semelhante ao apresentada no Algoritmo 2 e para obtenção dos resultados para a comunicação cooperativa foi utilizada uma rotina numérica semelhante ao apresentada no Algoritmo 4. Além disso, o cálculo do fator de distância foi realizado através de (2.4). Nota-se à partir dos resultados, um desempenho semelhante ao apresentado na Fig. 12, porém percebe-se dois fatos, primeiramente que existe uma diferença entre as curvas analíticas os resultados das simulações, isto deve-se ao fato de que a aproximação em (3.7) apresenta valores apropriados para o regime de alta SNR. Porém para o regime de baixa SNR ocorre a discrepância entre as curvas. Em segundo lugar, percebe-se que as curvas sofreram um deslocamento para direita, o que significa deterioração no desempenho, já que uma ordem de modulação superior é usada.

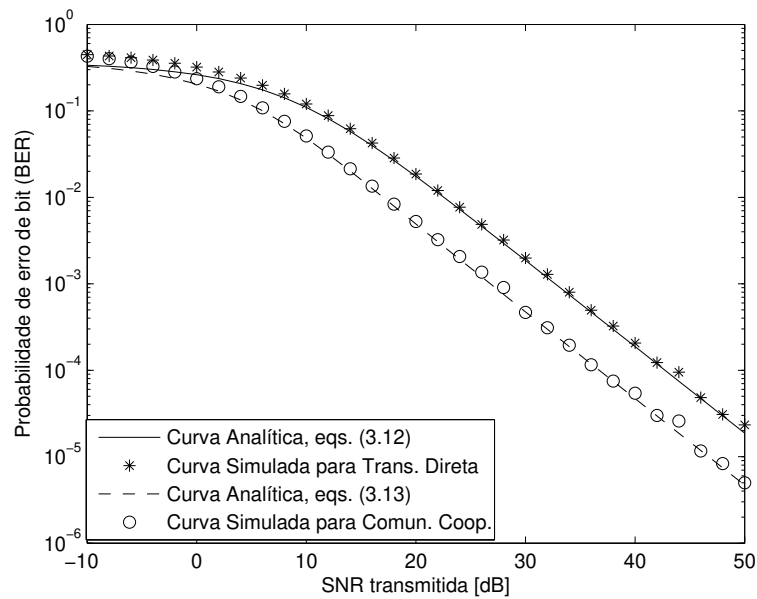


Figura 13 – BER vs. SNR transmitida em canais com desvanecimento, considerando sistemas de transmissão direta e cooperativo, para o esquema de modulação 16-QAM.

A Fig. 14 apresenta os resultados da BER em função da SNR transmitida para os sistemas de transmissão direta e comunicação cooperativa para um canal com desvanecimento para a modulação 64-QAM. Para a obtenção dos resultados para transmissão direta foi utilizada uma rotina numérica semelhante ao apresentada no Algoritmo 2 e para obtenção dos resultados para a comunicação cooperativa foi utilizada uma rotina numérica semelhante ao apresentada no Algoritmo 4. Além disso, o cálculo do fator de distância foi realizado através de (2.4). O desempenho das curvas é inferior àquele das Figs. 12 e Fig. 13, como esperado, já que uma ordem de modulação superior é usada.

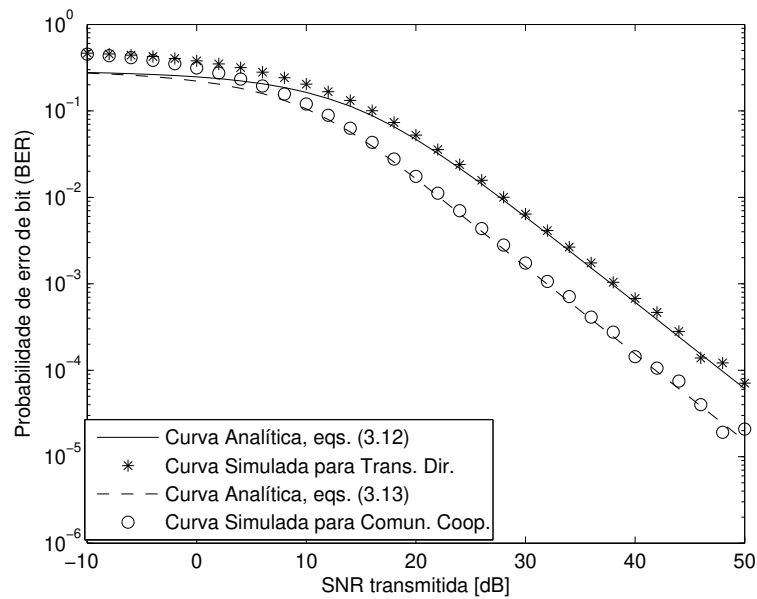


Figura 14 – BER vs. SNR transmitida em canais com desvanecimento, considerando sistemas de transmissão direta e cooperativo, para o esquema de modulação 64-QAM.

As Figs. 15 à 18 apresentam comparações das curvas resultantes para as modulações BPSK e M -QAM. A Fig. 15 apresenta os resultados da BER em função da SNR transmitida para os sistemas de transmissão direta para um canal AWGN para as modulações BPSK e M -QAM. Nota-se primeiramente que conforme aumenta a ordem da modulação, o desempenho piora para um mesmo valor de SNR transmitida. Isto se deve ao fato de que quanto maior o valor de M , mais próximos estão os símbolos da constelação e conseqüentemente maior a probabilidade de cometer erros durante a transmissão de informação. Note ainda que, para os esquemas BPSK e 4-QAM, o desempenho das curvas é igual, isto deve-se ao fato de que os esquemas de modulação BPSK e 4-QAM apresentam a mesma expressão para a probabilidade de erro de bit.

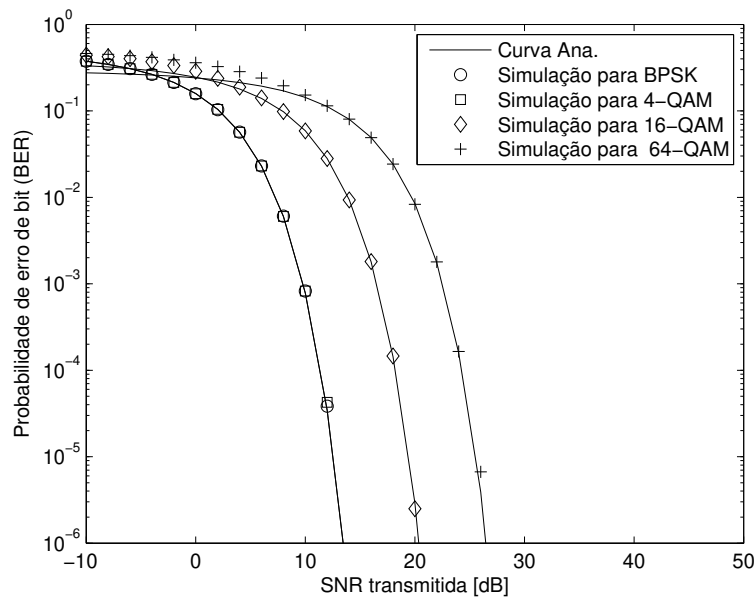


Figura 15 – BER vs. SNR transmitida em canais AWGN, considerando sistema de transmissão direta, para os esquemas de modulação BPSK e M-QAM.

Na Fig. 16 apresenta os resultados da BER em função da SNR transmitida para os sistemas de transmissão direta para um canal com desvanecimento para as modulações BPSK e M-QAM. Nota-se que as curvas apresentam um comportamento igual ao apresentado nas Figs. 12 a 14. Também é possível perceber que conforme a ordem da modulação aumenta, o desempenho piora.

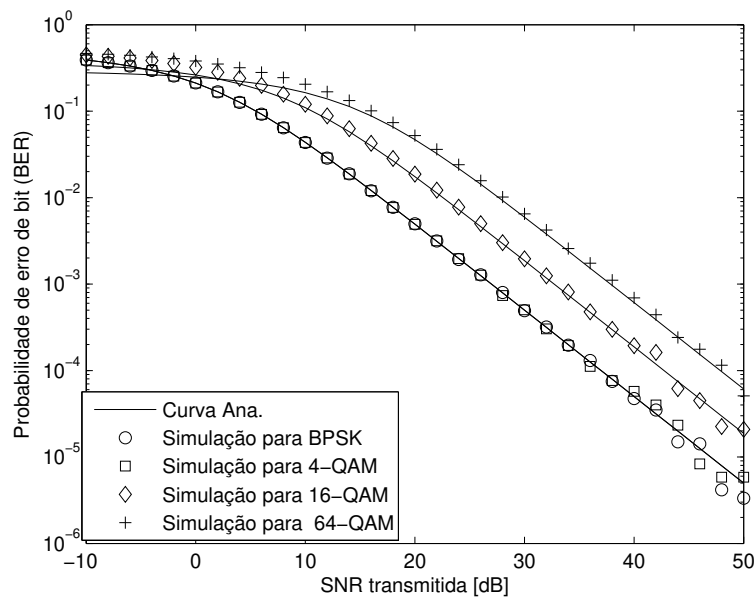


Figura 16 – BER vs. SNR transmitida em canais com desvanecimento, considerando sistema de transmissão direta, para os esquemas de modulação BPSK e M-QAM.

A Fig. 17 apresenta os resultados da BER em função da SNR transmitida para os sistemas de comunicação cooperativa para um canal AWGN para as modulações BPSK e M-QAM. Assim como nas Figs. 15 e 16, as modulações 4-QAM e BPSK apresentam o melhor desempenho enquanto que a modulação 64-QAM apresenta o pior desempenho. Também é possível notar a diferença entre as curvas analíticas e simuladas, isto deve-se ao fato de que a aproximação em (3.7) apresenta valores apropriados para o regime de alta SNR. Porém para o regime de baixa SNR ocorre a discrepância entre as curvas. Além disso, comparando as Figs. 15 e 17, nota-se que o sistema cooperativo para canal com ruído AWGN apresenta um desempenho superior.

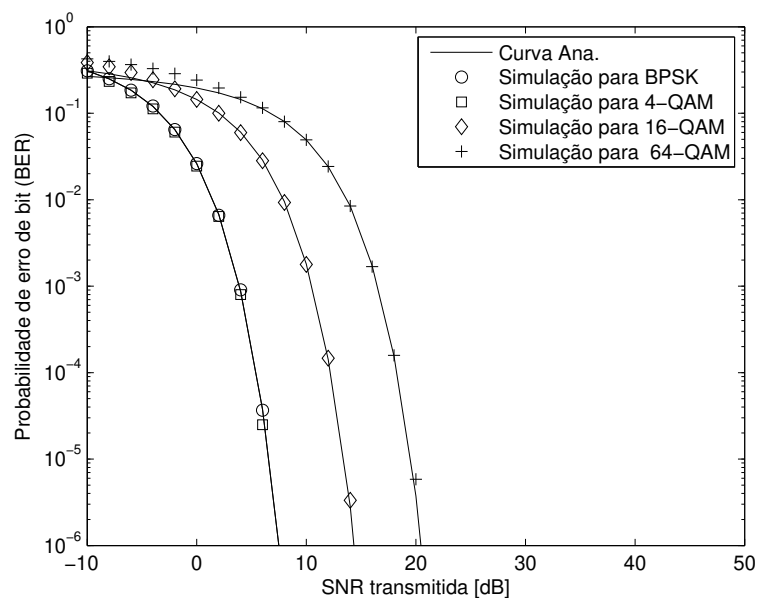


Figura 17 – BER vs. SNR transmitida em canais AWGN, considerando sistema cooperativo, para os esquemas de modulação BPSK e M-QAM.

Por fim, a Fig. 18, é possível notar que o comportamento é similar ao apresentado na Fig. 16, contudo comparando as Figs. 16 e 18 nota-se que o sistema cooperativo para canal com desvanecimento apresenta um desempenho superior. Por fim, é possível determinar a ordem de diversidade dos sistemas, a partir da inclinação das curvas na região de alta SNR. A ordem de diversidade define a quantidade de caminhos independentes entre fonte e destino para um dado sistema de transmissão. Desta maneira, avaliando-se a inclinação das curvas nas Figs. 16 e 18, tanto para o sistema de transmissão direta, quanto para o sistema cooperativo, é possível determinar que a ordem de diversidade é igual a 1, o que corrobora-se uma vez que existe apenas um caminho independente entre fonte e destino em ambos os casos.

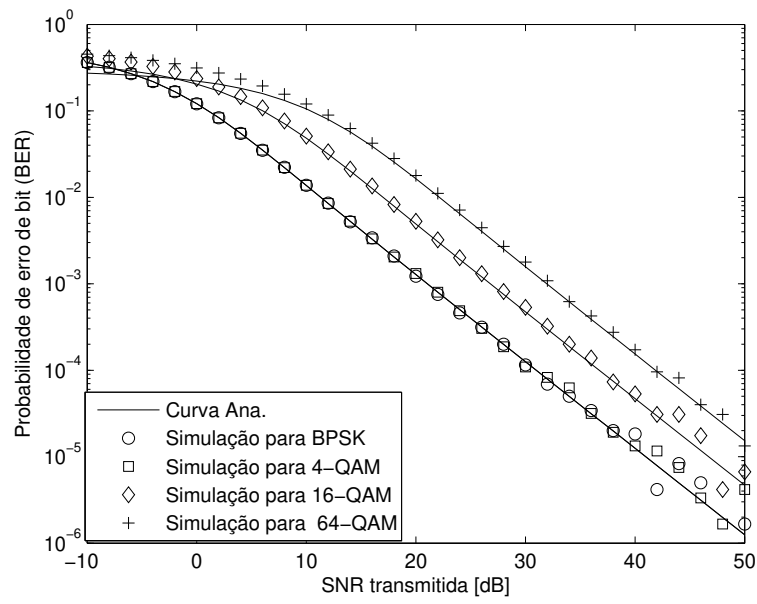


Figura 18 – BER vs. SNR transmitida em canais com desvanecimento, considerando sistema cooperativo, para os esquemas de modulação BPSK e M-QAM.

5 CONCLUSÕES

Conclui-se a partir dos resultados apresentados que as simulações numéricas realizadas foram implementadas da forma correta, pois apresentaram resultados consistentes às expressões analíticas. Também foi possível corroborar que as diferenças entre as curvas analíticas e os resultados das simulações, se deve ao fato de que a aproximação na expressão da BER para a modulação M -QAM é feita para o regime de alta SNR. Contudo para o regime de baixa SNR essa aproximação resulta em valores que diferem dos resultados obtidos através das rotinas numéricas. Além disso, concluiu-se que os esquemas de modulação M -QAM apresentam um desempenho inferior conforme aumenta a ordem de modulação, pois quanto maior a ordem de modulação (M), mais próximos os símbolos no diagrama de constelações e conseqüentemente maiores são as chances de ocorrerem erros. As modulações BPSK e 4-QAM apresentaram os melhores desempenhos para todos os cenários avaliados, deste modo conclui-se que elas apresentam menores valores de probabilidade de erro de bit para um mesmo valor de SNR, quando comparadas com outras modulações. Além disso, através dos resultados notou-se que os sistemas de comunicações cooperativas apresentam um desempenho superior ao apresentado para os sistemas de transmissão direta, ou seja, para o mesmo valor de SNR transmitida a BER é menor. Deste modo, os sistemas de comunicações cooperativas apresentam-se como uma alternativa para fornecer diversidade espacial e combater assim os efeitos de imparidade do canal, como o desvanecimento e ruído AWGN. Por fim, os sistemas de comunicações cooperativas podem ser combinados com outras técnicas de transmissão, como diversidade por múltiplas antenas ou códigos corretores de erro, com o objetivo de diminuir as degradações que o sinal pode sofrer e conseqüentemente melhorar o desempenho do sistema. Também é importante destacar que as rotinas numéricas elaboradas para este trabalho, podem ser utilizadas posteriormente para auxiliar outros projetos.

REFERÊNCIAS

- [1] G. Manganaro, D. Leenaerts, *Advances in Analog and RF IC Design for Wireless Communication Systems*, Elsevier, 2013.
- [2] H. Kim, *Wireless Communication System Design*, John Wiley Sons, Oct. 2015.
- [3] R. W. Heath Jr. *Introduction to Wireless Digital Communication: A Signal Processing Perspective*. 1st Edition. Prentice Hall, Mar. 22, 2017.
- [4] S. Haykin. *Digital Communication Systems*, John Wiley Sons, Feb. 2013.
- [5] M.R. Bhalla and A.V. Bhalla, *Generations of mobile wireless technology: A survey*, *Inter. Jor. of Comp. App.*, vol. 5, no. 4, pp. 26-32, Aug. 2010.
- [6] S. Shukla, V. Khare, S. Garg and P. Sharma, *Comparative study of 1G,2G,3G and 4G*, *Journal of Engineering, Computers Applied Sciences*, vol. 2, no. 4, pp. 55-63, Apr. 2013.
- [7] D. Fernandes, E. Sobrinho, J. Carvalho and M. Alves, “*Redes de Comunicações sem fio: Gerações de Telemóveis (1G, 2G, 3G, 4G)*”.
- [8] L.S. Ashiho, “*Mobile technology: Evolution from 1G to 4G*”, *Magazine Electronics for You*, Jun. 2003
- [9] Qualcomm, *The evolution of mobile technologies 1G, 2G, 3G, 4G LTE*, Disponível em: < <https://www.qualcomm.com/documents/evolutionmobile-technologies-1g-2g-3g-4g-lte> >. Acesso em: 17 de março de 2018
- [10] V. K. Garg, *Wireless Communication Networking; Networking*, 1st Edition, Elsevier, 13th Jun. 2017
- [11] W. Mohr, J. F. Monserrat, A. Osseiran, *Mobile and Wireless Communication for IMT-Advanced and Beyond*, John Wiley Sons, Aug. 2011.
- [12] T. S. Rappaport, *Wireless Communication Principles and Practice*, 2nd Edition, Prentice Hall, Dec. 2001.
- [13] E. B. Carne, *Connections for the Digital Age: Multimedia Communications for Mobile, Nomadic and Fixed Devices*, John Wiley Sons, Sept. 2011.
- [14] C. Cox, *An Introduction to LTE: LTE, LTE-Advanced, SAE, VoLTE and 4G Mobile Communication*, 2nd Edition, John Wiley Sons, Jul. 2014.

- [15] S. Z. Asif, Next Generation Mobile Communications Ecosystem: Technology Management for Mobile Communications, John Wiley Sons, Nov. 2010.
- [16] J. Wannstrom, "LTE-Advanced", Disponível em: < <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/97-lte-advanced> >. Acesso em: 19 de Julho de 2018.
- [17] G. I. Tsiropoulos, A. Yadav, M. Zeng and O. A. Dobre, "Cooperation in 5G Het-Nets: Advanced Spectrum Access and D2D Assisted Communications", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 24, no. 5, Aug. 2017.
- [18] E. Krouk, S. Semenov, Modulation and Coding Techniques for Wireless Communications, John Wiley Sons, Feb. 2011.
- [19] J. D. Gibson, Mobile Communications Handbook, 3rd Edition, CRC Press, Dec. 2017.
- [20] M. Safak, Digital Communications, John Wiley Sons, Mar. 2017.
- [21] Recommendation ITU-R P.37210 (10/2009) Radio noise, Disponível em: < <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.372-10-200910-S/en> >. Acesso em: 19 de Julho de 2018.
- [22] K. D. Wong, Fundamentals of Wireless Communication Engineering Technologies, John Wiley Sons, Jan. 2012.
- [23] G. F. Elmasry, Tactical Wireless Communication and Networks: Design Concepts and Challenges, John Wiley Sons, Nov. 2012.
- [24] Comparison of 8-QAM, 16-QAM, 32-QAM, 64-QAM 128-QAM, 256-QAM, Types. Disponível em: < <https://www.radio-electronics.com/info/rf-technology-design/quadrature-amplitude-modulation-qam/8qam-16qam-32qam-64qam-128qam-256qam.php> >. Acesso em: 14 de Julho de 2018.
- [25] M. O. Hasna, M. Alouini, "End-to-End Performance of Transmission Systems With Relays Over Rayleigh-Fading Channels", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 2, no. 6, Nov. 2003.
- [26] T. Riihonen, S. Werner and R. Wichman, "Hybrid full-Duplex/half-Duplex relaying with transmit power adaptation", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 10, no. 9, Sept. 2011.
- [27] P. Bhat, S. Nagata, L. Campoy, I. Berberana, T. Derham, G. Liu, X. Shen, P. Zong and J. Yang, "LTE-Advanced: An operator perspective", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 57, no. 5, pp. 3310-3315, Sep. 2008.

- [28] Q. Zhao, H. Li, and P. Wuang, "Performance of cooperative relay with binary modulation in Nakagami-m fading channels", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 57, no. 5, pp. 3310-3315, Sep. 2008.
- [29] S. Abdulhadi, M. Jaseemuddin and A. Anpalagan, "A Survey of distributed relay selection schemes in cooperative wireless Ad hoc Networks", *Wireless Pers. Commun.*, vol. 63, no. 4, pp. 917-935, Nov. 2010.
- [30] Y. Yang, H. Hu, J. Xu and G. Mao, "Relay Technologies for WiMAX and LTE-Advanced Mobile Systems", *IEEE Commun. Mag*, vol. 47, no. 10, pp. 100 - 105, Oct. 2009.
- [31] W. Elmenreich, N. Marchenko, H. Adam, C. Hofbauer, G. Brandner, C. Bettstetter and M. Huemer, "Building Blocks of Cooperative Relaying in Wireless Systems", *Elektrotechnik und Informationstechnik*, vol. 125, no. 10, pp. 353-359, Oct. 2008.
- [32] M. Dohler and Y. Li, *Cooperative Communications: Hardware, Channel and PHY*, 1st Edition, Wiley, 22th Mar. 2010.
- [33] T. Riihonen, S. Werner and R. Wichman, "Comparison of Full-Duplex and Half-Duplex with a Fixed Amplify-and-Forward", *IEEE Wireless Communication and Networking Conference*, 2009.
- [34] E. B. Olivo, D. P. M. Osorio, H. Alves, J. C. S. Filho and M. Latva-aho, "An Adaptive Transmission Scheme for Cognitive Decode-and-Forward Relaying Networks: Half Duplex, Full Duplex, or No Cooperation", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 15, no. 8, Aug. 2016.
- [35] D. P. M. Osorio, E. B. Olivo, H. Alves, J. C. S. Filho and M. Latva-aho, "Exploiting the Direct Link in Full-Duplex Amplify-and-Forward Relaying Networks", *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 15, no. 8, Aug. 2016.
- [36] J. N. Laneman, D. N. C. Tse and G. W. Wornell, "Cooperative Diversity in Wireless Networks: Efficient Protocols and Outage Behavior", *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 50, no. 12, Aug. 2004.
- [37] J.G. Proakis, *Digital Communications*, 4th ed., McGraw-Hill, 2000.
- [38] J.R. Barry, E. A. Lee and D. G. Messerschmitt *Digital Communication*, 3th ed., LLC, 2004.