

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO
DEPARTAMENTO DE COMUNICAÇÕES



Tese de Mestrado

**Análise de Desempenho de
Redes de Sensores Sem Fio**

André Gustavo Mignaco

Orientador: Prof. Dr. Paulo Cardieri

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Michel Daoud Yacoub

(FEEC/UNICAMP)

Prof. Dr. Omar Branquinho

(PUC/Campinas)

Prof. Dr. Renato Baldini Filho

(FEEC/UNICAMP)

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica

Campinas – SP – Brasil

Dezembro de 2005

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

M588a Mignaco, André Gustavo
Análise de desempenho de redes de sensores sem fio /
André Gustavo Mignaco. --Campinas, SP: [s.n.], 2005.

Orientador: Paulo Cardieri
Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de
Computação.

1. Sistemas de comunicação sem fio. 2. Sistemas de
telecomunicações. 3. Telecomunicações. I. Cardieri, Paulo.
II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Titulo em Inglês: Analysis of wireless sensor networks performance.

Palavras-chave em Inglês: Ad hoc networks, Sensor ad hoc networks, Connectivity,
Transport capacity, Information efficiency

Área de concentração: Telecomunicações e Telemática

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: Michel Daoud Yacoub, Omar Branquinho, Renato Baldini Filho

Data da defesa: 22/12/2005

RESUMO

As redes de sensores sem fio têm merecido atenção especial nos últimos anos graças às suas características intrínsecas que as tornam atrativas em diversas aplicações, como em atividades industriais, de monitoramento de meio ambientes e segurança, entre outros.

As mesmas características que tornam atrativas as redes de sensores sem fio fazem a análise do seu desempenho dificultoso. Diversos conceitos de medida da capacidade de redes *ad hoc* em geral têm sido propostos, incluindo a capacidade de transporte e a eficiência de informação. Nesta dissertação é introduzida uma variação do conceito de eficiência de informação, denominada *eficiência de informação agregada*, que leva em conta a habilidade da rede em reutilizar o canal de comunicação espacialmente. É apresentada uma análise da eficiência de informação agregada de uma rede de sensores sem fio em diversos cenários, utilizando-se diferentes modelagens da rede sem fio. Os resultados mostram que o meio em que a rede é empregada tem grande importância no seu desempenho, podendo ser decisivo na escolha do esquema de modulação a ser empregado. Também foi observado que transmitir em curtas distâncias é mais vantajoso que transmitir em longas distâncias na maioria dos casos.

Abstract

Wireless sensor networks have deserved special attention in the last years due to their intrinsic characteristics that become them attractive in various applications, such as in the industrial activities, in the environment monitoring and security, among others.

The same characteristics that become the wireless sensor networks attractive make hard the analysis of their performance. Many concepts of measure of capacities of *ad hoc* networks have been proposed, including the transport capacity and the information efficiency. In this dissertation is introduced a variation of the concept of information efficiency, called aggregated information efficiency, that takes into account the ability of the network in reusing spatially the communication channel. It is presented an analysis of the aggregated information efficiency of a wireless ad hoc network in many scenarios, where are used different models of the wireless network. The results show that the environment where the network is employed has a big importance in its performance, and it can be decisive in the choice of the modulation scheme to be used. Also was observed that to transmit in short distances is better than do it in longer ones in the majority of the cases.

Para meus pais,
Gilmar e Vera, pelo constante apoio
que sempre me deram em todos aspectos.

O êxito é conquista de quem se levanta
mesmo quando cai, e de quem se esforça, sem
se derrotar, mesmo quando fracassa muitas
vezes.

M. Taniguchi

AGRADECIMENTOS

- ❑ A Deus, por mais uma oportunidade de crescimento;
- ❑ Aos meus pais, por tudo o que fizeram e ainda fazem por mim;
- ❑ Ao meu orientador, Paulo Cardieri, pelo exemplo de pessoa e orientador que é;
- ❑ A UNICAMP, pela oportunidade de cursar o mestrado;
- ❑ Ao CNPq, pelos 18 meses de apoio financeiro;
- ❑ A minha namorada, Patrícia, pelo constante incentivo;
- ❑ Aos colegas de curso que tornaram os dias mais amenos com as suas presenças;
- ❑ E a todos os funcionários da Unicamp que sempre foram muito prestativos e educados.

ÍNDICE

RESUMO	iii
ABSTRACT.....	iii
LISTA DE TABELAS.....	viii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE SÍMBOLOS	xi

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO	01
1.1 Redes de Sensores Sem Fio	01
1.2 Características de uma Rede de Sensores Sem Fio	04
1.3 Aspectos do Sistema de Comunicação Sem Fio	05

CAPÍTULO 2

CONECTIVIDADE.....	07
2.1 Introdução.....	07
2.2 Fatores que Influenciam a Conectividade de uma Rede	10
2.3 Modelagem do Grau do Terminal de uma Rede de Sensores sem Fio.....	11
2.3.1 Ambiente com Perda de Percurso Determinística em relação à potência .	11
2.3.2 Ambiente com Desvanecimento de Larga Escala variável	13
2.4 Análise Numérica.....	17
2.5 Conclusão.....	20

CAPÍTULO 3

EFICIÊNCIA DE INFORMAÇÃO AGREGADA.....	21
3.1 Introdução.....	21

3.2 Modelagem da Rede <i>Ad hoc</i>	23
3.3 Estimação do Raio da Área de Silêncio.....	28
3.4 Resultados Numéricos	33
3.4.1 Distância Transmissor - Receptor Arbitrária	33
3.4.2 Receptor é o Vizinho mais Próximo	39
3.5 Conclusões	40

CAPÍTULO 4

MODELAGEM ALTERNATIVA PARA A EFICIÊNCIA DE INFORMAÇÃO AGREGADA.....	42
4.1 Introdução.....	42
4.2 Modelagem da Rede <i>Ad Hoc</i>	43
4.2.1 Modelo de Canal de Propagação	44
4.2.2 Modelo de Rede <i>Ad Hoc</i>	44
4.2.3 Simulação	45
4.3 Resultados Numéricos	46
4.3.1 Densidade de Enlaces Ativos.....	47
4.3.2 Eficiência Agregada	50
4.4 Conclusões	53

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES.....	54
5.1 Principais Resultados e Contribuições.....	54
5.2 Trabalhos Futuros.....	56
5.3 Publicações.....	57

REFERÊNCIAS	58
--------------------------	-----------

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1: Exemplos de fontes de energia ambientais	04
Tabela 2.1: Parâmetros usados na simulação.....	17
Tabela 4.1: Configuração de parâmetros do cenário	47

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Arquitetura típica de uma rede de sensores sem fio	02
Figura 2.1: Probabilidade de <i>link</i> para <i>node degree</i> $k \geq 2$	13
Figura 2.2: Probabilidade de enlace para vários valores de ξ e F	15
Figura 2.3: Distribuição do número de vizinhos de um terminal em ambientes com e sem desvanecimento	19
Figura 2.4: Distribuições de terminais vizinhos sem e com desvanecimento para $\xi_1 = 0,230$ e $\xi_1 = 0,345$	19
Figura 2.5: Razão entre o raio médio de alcance com desvanecimento R_d e aquele sem desvanecimento r_e para ξ_1 entre 0 e 1	20
Figura 3.1: Modelo para o cálculo da interferência: Rx e Tx são os terminais receptor e transmissor.	29
Figura 3.2: Ilustração do processo iterativo	31
Figura 3.3: Raio de silêncio em função do limiar SIR para expoente de perda de percurso igual a 3,5 e 6.	33
Figura 3.4: Eficiência de informação em função da distância de transmissão considerando diferentes esquemas de modulação e expoente de perda de percurso igual a $n = 3,5$	34
Figura 3.5: Eficiência de informação em função da distância de transmissão considerando diferentes esquemas de modulação e expoente de perda de percurso igual a $n = 6$	35
Figura 3.6: Densidade de terminais ativos para diferentes expoentes de perda de percurso e razão das densidades de terminais ativos entre BPSK e 16-PSK.	36
Figura 3.7: Eficiência de informação para diferentes n e $d_{TR} = 2,5m$	37
Figura 3.8: Eficiência de informação para diferentes n e $d_{TR} = 10,0m$	37
Figura 3.9: Densidade de enlaces ativos e eficiência para diferentes probabilidade de acerto de pacote	37
Figura 3.10: Eficiência de informação para diferentes probabilidades de erro	

de pacote e expoentes de perda de percurso.....	38
Figura 3.11: Eficiência para diferentes probabilidade de erro de pacote e tamanhos de pacotes.....	39
Figura 3.12: Densidade de enlaces ativos e eficiência para diferentes densidades de terminais....	40
Figura 4.1: Para transmissor-receptor	44
Figura 4.2: Exemplo de resultado de simulação	46
Figura 4.3: Densidade de enlaces ativos em função da densidade de enlaces ativos para expoente de perda de percurso $n = 3,5$	48
Figura 4.4: Distância média de separação entre transmissor-receptor (d_{TR}) em função da densidade de terminais para diferentes valores de alcance de transmissão... ..	49
Figura 4.5: Densidade de enlaces ativos em função da distância de transmissão para expoente de perda de percurso igual a 3,5 e diferentes esquemas de modulação	49
Figura 4.6: Densidade de enlaces ativos x raio de transmissão para diferentes expoentes de perda de percurso.....	50
Figura 4.7: Eficiência agregada para QPSK e diferentes raios de transmissão r_c	51
Figura 4.8: Eficiência agregada para esquemas de modulação diferentes e $n = 3,5$	51
Figura 4.9: Eficiência agregada x raio de transmissão, para diferentes esquemas de modulação e diferentes valores de n . A densidade de nós na rede é $\rho = 0,125$ nós/m ²	53

Lista de Símbolos e Abreviaturas

MEMS: Micro-Elétrico-Mecânico;
RSSFs: Redes de Sensores Sem Fio;
k: número de caminhos independentes ou número de terminais vizinhos
n: expoente de perda de percurso;
c: constante que leva em conta os ganhos das antenas transmissora e receptora, distância de referência e frequência de operação;
r: distância;
 P_T : potência de transmissão;
 r_c : alcance de transmissão ou raio de cobertura;
 A_0 : área de cobertura de um terminal;
A: área da rede;
N: grau de terminal ou número de terminais vizinhos;
 K_{min} : número mínimo de vizinhos
 ρ : densidade de terminais da rede;
Z: número de terminais da rede;
p: probabilidade de que exista um terminal dentro da área de cobertura A_0 ;
 λ : valor médio de N;
 σ : desvio padrão;
X: variável aleatória Gaussiana;
 $\hat{r}$: distância entre dois terminais normalizada pelo raio de cobertura;
 $p(\hat{r})$: probabilidade de recepção correta ou probabilidade de enlace;
F: figura de ruído;
 ξ : razão entre σ e n;
 $f_R(r)$: função densidade da distância;
 T_L : perda total de potência;
 l_1 : limiar superior de atenuação;
S: variável aleatória Gaussiana para atenuação;
 σ_1 : constante;
 k_o e k_1 : constantes;
a e b: constantes;
 R_d : raio de cobertura médio na presença de desvanecimento;
 ξ_1 : constante;
 P_S : probabilidade de acerto de pacote;
 d_{TR} : distância entre transmissor e receptor;
 η : progresso esperado na direção do destino;
 ζ : vazão do enlace;
p: probabilidade de um terminal transmitir um pacote;
 ϵ : eficiência espectral;
E: eficiência de informação agregada;
 γ : limiar inferior de razão sinal-interferência;
 R_s : raio de silêncio;
A: área da rede;
L: tamanho do pacote em bits;

SIR: razão sinal-interferência;
 B: largura espectral;
 $P_{e, pacote}$: probabilidade de erro de pacote máxima admissível;
 A_s : área de silêncio;
 N_a : número de enlaces ativos;
 R: raio da rede;
 ρ_a : densidade de enlaces ativos;
 r_o : distância de referência;
 P_R : potência recebida;
 $P_{r,min}$: limiar inferior de recepção ou sensibilidade do receptor;
 M: número de níveis de modulação;
 I_T : potência interferente;
 ρ_i : densidade de interferentes;
 I_T : potência de interferência total;
 SNR: razão sinal-ruído;
 ρ_i^c : densidade de interferentes corrigida.
 U_R : conjunto de terminais receptores;
 U_T : conjunto de terminais transmissores;
 J: número de realizações para um mesmo cenário.

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo é explicado o que consiste uma rede de sensores sem fio, descrevendo suas particularidades, a estrutura dos seus componentes, as diferenças desta rede para outros tipos de redes sem fio existentes e os desafios a serem vencidos para que ela possa ser utilizada pelo maior tempo e com a melhor desempenho possível em diversos cenários de aplicação. Além disso, é mostrado como a tese está estruturada, dando uma breve descrição do assunto e do objetivo dos seus capítulos.

1.1 Redes de Sensores Sem Fio

Redes de sensores sem fio (RSSFs) são redes formadas por nós sensores que são responsáveis pela obtenção de informação e possuem capacidade de comunicação e de processamento de dados. Um nó sensor é tipicamente composto por um terminal de comunicação rádio e um dispositivo sensor. Este tipo de rede é uma variação de redes *ad hoc* de múltiplos saltos [9], com todas as particularidades desta última, além de algumas próprias,

tais como tamanho reduzido dos terminais e limitação de capacidade de processamento e de comunicação, e limitação de energia disponível [4].

Avanços tecnológicos nas áreas de sistemas micro-elétrico-mecânico (MEMS) [1] [7] e comunicações sem fio, entre outras, têm possibilitado o desenvolvimento de nós sensores de baixo custo, baixa potência e multifuncionais, e com a habilidade de comunicação via rádio [6].

As RSSFs podem ainda ser homogêneas ou heterogêneas. No caso de redes homogêneas, todos os seus nós sensores possuem as mesmas funções e a mesma constituição. Nas redes heterogêneas, há diversos tipos de nós sensores, com diferentes características, com capacidade de processamento e comunicação, nível de energia disponível, etc.

A Figura 1.1 mostra uma arquitetura típica de uma RSSF.

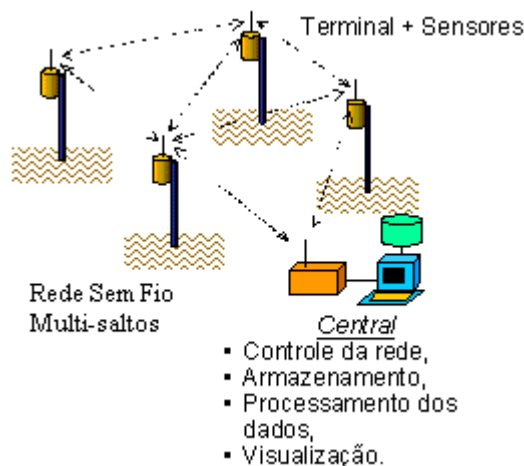


Figura 1.1: Arquitetura típica de uma rede de sensores sem fio.

Os nós sensores são constituídos de componentes sensores e de equipamentos de processamento de informação e de comunicação, sendo responsáveis pela captura dos dados de interesse. Os equipamentos de transmissão (aqui denominados terminais) são responsáveis pelo envio dos dados coletados até uma central de coleta e controle, estabelecendo assim uma rede de comunicação sem fio *ad hoc*. No caso mais comum, os terminais não conseguem estabelecer um enlace de comunicação diretamente com a central de coleta, de forma que enlaces com múltiplos saltos são formados, caracterizando uma rede *ad hoc* de múltiplos saltos. O equipamento de processamento de informação, por sua vez, permite que a informação coletada seja processada antes da sua transmissão até uma central de coleta. Este

processamento pode envolver a colaboração entre os nós sensores de forma a otimizar os recursos disponíveis.

Pelas suas características, as redes de sensores possuem uma larga gama de aplicações, incluindo aplicações industriais, controle ambiental, segurança, localização, etc. Deste modo, é previsto que as redes de sensores possam estar bastante presentes na vida das pessoas nas próximas décadas [2][3][8][10].

As redes de sensores sem fio baseiam-se no conceito de redes de comunicação *ad hoc* [9], conforme já citado. Porém, os protocolos e mecanismos de comunicação empregados em uma rede *ad hoc* convencionais [9] não são adequados para uma rede de sensores sem fio, pois esta última possui algumas características que a torna única.

Algumas das diferenças típicas entre as redes de sensores sem fio e as redes *ad hoc* convencionais são [1]:

- A densidade de nós sensores na RSSF pode ser muitas ordens de grandeza superior à densidade das redes *ad hoc*, o que exige atenção especial dos mecanismos de comunicação quanto a escalabilidade;
- Uma vez que os nós sensores podem estar localizados em locais de difícil acesso ou por não se desejar interromper o monitoramento de um evento para não influenciar nos resultados, os nós sensores podem não receber manutenção (como troca de bateria, por exemplo), estando, assim, mais sujeitos a falhas, o que exige mecanismos especiais nas redes de sensores de forma a garantir o funcionamento adequado da rede;
- Nós sensores usam, geralmente, comunicação por rádio difusão, enquanto que a maioria das redes *ad hoc* utiliza comunicação ponto a ponto;
- Redes de sensores são severamente limitadas em potência, capacidades computacionais e memória;
- RSSFs podem não ter identificação global (IP) devido à grande quantidade de cabeçalho e ao grande número de sensores;

Uma importante restrição das redes de sensores sem fio está relacionada à sua fonte de energia. Devido à sua característica sem fio, supõe-se que estas redes sejam alimentadas por baterias ou por técnicas não convencionais. Exemplos de forma de obtenção de energia incluem células solares, transdutores de campos eletromagnéticos e transdutores de vibração

mecânica. A Tabela 1.1 mostra algumas alternativas de fonte de energia para redes de sensores [5].

Fonte de energia	Transdutor	Potência
Solar	Célula fotovoltaica	20 mW
Campo magnético	Espira	1,5 mW
Vibração em HF	Bobina que se move MEMS	100 μ W
Campo RF	Antena	5 μ W

Tabela 1.1: Exemplos de fonte de energia ambientais.

Esta tabela mostra que as fontes de energia alternativas em redes de sensores sem fio são limitadas. Além disso, em caso de uso de baterias, em muitas aplicações a substituição destas pode ser impraticável ou mesmo impossível. Portanto, o baixo consumo de energia deve ser o principal objetivo no desenvolvimento dos mecanismos e técnicas envolvidos em uma rede de sensores sem fio.

1.2 Características de uma Rede de Sensores Sem Fio

As redes de sensores sem fio possuem algumas características particulares com relação ao seu comportamento, como descrito a seguir [1][5]:

- A taxa de transmissão das RSSFs são tipicamente mais baixas do que em redes sem fio convencionais, pois a informação tem um taxa de geração baixa. Por exemplo, em uma rede de sensores para coleta de temperatura, o intervalo de captura da temperatura pode ser da ordem de minutos ou horas. Além disso, o tráfego ocorre tipicamente em forma de surtos. Estas características do tráfego afetam os mecanismos de comunicação, bem como a técnica de acesso ao meio de rádio e a modulação.
- Colaboração entre os sensores é essencial para o funcionamento da rede em muitas aplicações. Esta colaboração pode contribuir para a economia de energia das baterias ou para aumentar a eficiência dos recursos de transmissão. Por exemplo, antes de enviar a sua informação coletada, um nó sensor pode verificar com os seus vizinhos se a mesma informação já foi encaminhada à central de coleta.
- A topologia das redes de sensores sem fio deve ser dinâmica devido às falhas de seus componentes, ao esgotamento da bateria, à mobilidade de seus nós sensores, ou mesmo devido às características da aplicação. Portanto, os mecanismos de comunicação e de controle da rede devem ser adequados para enfrentar variações da topologia.

- A grande quantidade de nós sensores em uma rede de sensores é outra característica importante que a diferencia das redes convencionais. Novamente, os mecanismos de comunicação e controle devem ser adequados, com atenção especial à escalabilidade.
- A tolerância à falhas dos mecanismos de comunicação e controle é um requisito importante das redes de sensores. Trata-se da habilidade da rede em manter seu correto funcionamento após a ocorrência de uma falha de um ou mais de seus componentes.

1.3 Aspectos do Sistema de Comunicação Sem Fio

As redes de sensores sem fio são uma aplicação das redes sem fio *ad hoc*. Desta forma, no que se refere ao sistema de comunicação, as redes de sensores sem fio herdam muitas das características inerentes das redes sem fio convencionais e das redes *ad hoc*. Além disso, no caso mais geral, as redes de sensores empregam a comunicação em múltiplos saltos, o que aumenta a complexidade de operação. Portanto, o desempenho global de uma rede de sensores sem fio está fortemente influenciado pelo desempenho da rede de comunicação associada à rede de sensores.

Em uma aplicação típica de redes de sensores, não é possível fazer um planejamento da rede de comunicação como é feito nas redes de comunicação convencionais (por exemplo, as redes celulares). Assim, os terminais são, geralmente, espalhados aleatoriamente na área de aplicação ou posicionados de acordo com algum outro critério. Mecanismos de autoconfiguração são então usados para a formação da rede de comunicação, ou seja, para o estabelecimento de enlaces de comunicação. Neste contexto, um aspecto importante das redes de sensores sem fio (e também das redes *ad hoc* em geral) é a habilidade de a rede garantir que todos os seus terminais consigam se comunicar com a central de controle e, num caso amplo, com todos os outros terminais, mesmo que por meio de seus vizinhos, através do modo de múltiplos saltos.

Surge, então, o conceito de conectividade da rede e do grau de terminal, que estão diretamente relacionados com as características da rede de comunicação. Por conseguinte, cria-se também a necessidade de se estabelecer as condições necessárias para se garantir um nível de conectividade aceitável que garanta a comunicação entre todos os elementos da rede. Os conceitos de conectividade e de grau de terminal serão discutidos no Capítulo 2 desta

dissertação, com especial atenção a este último. Serão apresentadas modelagens para o grau do terminal em ambientes de propagação com e sem desvanecimento de larga escala.

Uma questão que tem merecido especial atenção nos últimos anos é a modelagem da capacidade de escoamento de tráfego em redes sem fio *ad hoc* com múltiplos saltos. As características intrínsecas destas redes, como a ausência de uma entidade controladora central, e as características típicas das redes sem fio, dificultam a modelagem e análise da capacidade. As redes *ad hoc* sem fio, incluindo as redes de sensores sem fio, geralmente empregam um canal único para a comunicação de todos os terminais. Desta forma, o principal fator de degradação da qualidade de comunicação é a interferência provocada pelos outros terminais.

Nesta dissertação é apresentada uma análise da capacidade de escoamento de tráfego de redes de sensores sem fio com o intuito de se mensurar a eficiência da rede em transmitir informação. A análise é baseada em modelagens propostas para a rede de comunicação que levam em conta a qualidade do enlace transmissor-receptor, medida em termos da relação sinal-interferência. Por meio destas modelagens estima-se a chamada *eficiência de informação agregada* que mede a eficiência com que os enlaces transmitem a informação, combinada com a eficiência com que a rede reutiliza o canal de comunicação espacialmente. Esta análise é conduzida para diferentes cenários de redes de comunicação. As análises mostram que esta eficiência é influenciada por fatores como as características do ambiente de propagação, esquema de modulação empregado e qualidade do enlace desejada. Nos Capítulos 3 e 4 desta dissertação serão apresentados as modelagens desenvolvidas e os resultados das análises correspondentes.

Por fim, no Capítulo 5 é apresentado um resumo das principais conclusões mostradas ao longo da Tese e também algumas propostas de trabalhos futuros que podem ser realizados para continuação e aprimoramento deste trabalho.

Capítulo 2

Conectividade

Este capítulo apresenta o conceito de conectividade e o de grau de terminal, mostrando a importância de se ter uma rede com graus maiores de conectividade e as dificuldades para se atingir tal objetivo.

Na verdade, não são apresentados resultados novos, mas sim uma reunião de diversos resultados importantes. Dada a grande importância deste assunto e a fim de confirmar e discutir sobre os resultados teóricos apresentados, foram análises e algumas simulações, e as conclusões obtidas concordam os resultados analíticos.

2.1 Introdução

Uma questão importante no contexto de redes sem fio de múltiplos saltos é a da *conectividade* da rede, ou, de outro modo, das condições necessárias para que todos os terminais da rede se comuniquem entre si, ainda que indiretamente por meio de seus vizinhos. Esta questão é crucial, pois dela depende a própria existência da rede. O aumento da gama de

aplicações práticas das redes de sensores sem fio tem motivado pesquisadores a dispensarem atenção especial nos últimos anos a esta questão.

A *conectividade* de uma rede de comunicação é definida como a capacidade de dois nós quaisquer da rede comunicarem-se, mesmo que por meio de outros terminais. Desta forma, a conectividade está relacionada à existência de pelo menos um caminho entre dois terminais quaisquer [13] [14]. Por conseguinte, a *probabilidade de conectividade* é a probabilidade de existir este caminho. De uma forma mais geral, uma rede com *conectividade* k é aquela em que existem pelos menos k caminhos independentes entre um par qualquer de terminais A e B da rede, onde por independente entende-se que ao longo dos caminhos distintos entre A e B os únicos terminais comuns são os terminais fonte e destino. Tal rede é dita, então, *k-conectada*. Uma consequência desta definição é que, para uma rede *k-conectada*, a exclusão de $k-1$ terminais não a torna desconectada [13].

Deste modo, a conectividade de uma rede e sua correspondente probabilidade são uma medida da garantia de manutenção da comunicação entre seus terminais.

A questão da conectividade se mostra mais relevante em redes de sensores sem fio, pois, devido às suas características (como, por exemplo, a impossibilidade de recarregamento da bateria de seus componentes ou mesmo a inexistência de manutenção em diversas aplicações), a possibilidade de perda de conectividade é mais crítica. Por exemplo, os terminais de uma rede de sensores têm limitações ao consumo de energia, o que afeta o alcance de transmissão e, conseqüentemente, a conectividade. Além disso, na maioria das aplicações não há mobilidade dos componentes da rede de sensores sem fio, de modo que quando um obstáculo está presente na linha de visada de dois terminais, eles perdem a comunicação por tempo indeterminado, o que leva a uma redução da conectividade da rede.

Um conceito importante no contexto de conectividade é o de *terminal vizinho*. Um terminal B é considerado vizinho do terminal A se receber corretamente a mensagem de A. A rigor, para que a mensagem de A seja recebida corretamente por B, é necessário que (1) a potência do sinal de A recebido em B seja superior a um certo limiar de recepção $P_{R,\min}$ (conhecido como sensibilidade do receptor) e que (2) a relação sinal-ruído do sinal recebido esteja acima de um limiar γ . Na análise da conectividade é comum desconsiderar a condição (2) na definição de terminal vizinho. A razão disso é que se supõe a existência de um mecanismo de controle de acesso que inibe as transmissões dos terminais que estejam

próximos do receptor de um enlace ativo. Nos Capítulos 3 e 4 desta dissertação a condição (2) será retomada em outro contexto.

Assim, desprezando-se condição (2), para um modelo de canal com perda de percurso determinística apenas, a potência do sinal recebido P_R vale

$$P_R = \frac{P_T c}{r^n}, \quad (2.1)$$

em que P_T é a potência de transmissão, r é a distância de separação entre o transmissor e o receptor, n é o expoente de perda de percurso e c é um termo que engloba as influências dos ganhos das antenas transmissora e receptora, frequência, etc. Portanto, o alcance r_e de transmissão é dado por:

$$r_e = \left(\frac{c P_T}{P_{R, \min}} \right)^{1/n}. \quad (2.2)$$

Outro conceito importante é o do número médio de terminais vizinhos de um terminal, chamado de *grau do terminal* N (do inglês *node degree*). O grau do terminal aumenta com o aumento do alcance de transmissão e o seu valor médio em uma rede é uma medida da conectividade da rede, pois indica com quantos terminais um dado terminal pode estabelecer um enlace. Note-se, no entanto, que mesmo que os graus de todos os terminais da rede sejam pelo menos um, não há garantias de que a rede esteja completamente conectada, pois pode existir um par de terminais que são vizinhos apenas entre si (portanto, com grau 1 de conectividade), mas não são vizinhos de qualquer outro terminal, ou ainda, podem existir pequenos grupos de terminais que não estão conectados com um grupo maior de terminais da rede onde todos os terminais possuem um número de vizinhos mais elevado [11].

Neste capítulo serão analisados alguns aspectos do grau do terminal relativos ao canal de propagação. Será mostrado como o desvanecimento de grande escala o influencia. Antes, porém, alguns fatores que afetam a conectividade da rede são discutidos.

2.2 Fatores que Influenciam a Conectividade

Dois fatores principais que afetam a conectividade de uma rede sem fio são o alcance de transmissão e a densidade de terminais na rede.

Alcance de transmissão

O alcance de transmissão depende, dentre outros fatores, da potência de transmissão e da sensibilidade do receptor. Assim, supondo a sensibilidade do receptor fixa, o aumento do alcance é conseguido às custas de um maior consumo de energia, o que, em caso de alimentação do terminal por meio de bateria, leva a uma diminuição na vida útil do mesmo.

Sob o ponto de vista da conectividade, deseja-se aumentar o alcance de transmissão, devido ao conseqüente aumento do número de terminais vizinhos, o que aumenta a probabilidade de haver um caminho entre dois terminais quaisquer. Além disso, o aumento do alcance faz com que o percurso entre dois nós quaisquer tenha um menor número de saltos, o que diminui o atraso de envio da mensagem do terminal fonte ao destino e diminui a intensidade de tráfego escoado na rede, pois a mensagem da fonte deverá ser transmitida um menor número de vezes até chegar ao destino. Por outro lado, além do indesejado aumento do consumo de energia do terminal, um maior alcance de transmissão pode significar maior interferência entre os terminais, prejudicando a capacidade de vazão de tráfego da rede. Esta questão será discutida com mais detalhes nos Capítulos 3 e 4.

Densidade de terminais na rede

O aumento da densidade de terminais significa que as distâncias entre os terminais diminuem, o que leva a um aumento do número de vizinhos de um terminal, mantido o alcance de transmissão. Portanto, o aumento da densidade de terminais leva ao aumento da conectividade da rede. Note que um aumento da densidade da rede, na maioria das vezes, não aumenta a distância física entre os terminais fonte e destino.

O alcance de transmissão e a densidade de terminal levam a outros fatores que influenciam a conectividade como:

- Tempo médio de transmissão e períodos de dormência;
- Taxa de transmissão;
- Interferência co-canal.

Tais fatores não serão discutidos aqui, mas maiores detalhes podem ser encontrados em [15] e [16].

Um outro efeito importante é o efeito de borda: os efeitos de borda são causados pelos nós localizados próximos às bordas da rede. Estes terminais, supondo o uso de um mesmo raio de cobertura para todos, terão uma quantidade de vizinhos menor, ou seja, terão um menor grau de terminal. Conseqüentemente, terão um menor número de caminhos independentes ligando-os a um destino final. Assim, a conectividade da rede, como um todo, é prejudicada [13].

Na prática, não há maneira de se evitar os efeitos de borda. Já em simulações, isto é possível através de modelos que consideram apenas os nós localizados dentro de uma área central para análise (portanto haverá um grau de terminal mais homogêneo), ou através do uso de modelos específicos para simulação, como o modelo toroidal, onde os terminais localizados em extremos opostos da rede possuem conexão [13].

É relevante dizer que os efeitos de borda foram evitados nas simulações feitas nesta tese. No momento oportuno, este assunto será retomado.

2.3 Modelagem do Grau do Terminal de uma Rede Sem Fio

O número de terminais vizinhos (ou grau) de um terminal em uma rede sem fio em que os terminais são distribuídos aleatoriamente é uma variável aleatória. Portanto, a análise do grau do terminal requer a determinação das suas características estatísticas, em particular a sua distribuição. Devido à clara relação entre condições de propagação e o grau do terminal, esta análise deve partir da modelagem do canal de propagação. Neste item serão analisadas as distribuições do grau do terminal para dois ambientes de propagação: em um deles é incluída apenas a perda de percurso determinística e no outro, inclui-se também o desvanecimento de larga escala.

2.3.1 Ambiente com Perda de Percurso Determinística

Em um ambiente em que a única degradação que a potência do sinal transmitido sofre é a perda devido ao percurso, um terminal conseguirá estabelecer um enlace de comunicação com qualquer outro terminal que estiver a uma distância de, no máximo, r_e dada por (2.2).

Considerando o raio de cobertura de um nó, a área $A_0 = \pi r_e^2$ é dita a área de cobertura do terminal.

Considere que a rede seja composta por Z terminais idênticos, distribuídos aleatoriamente em uma região de área A , tal que a densidade de terminais seja $\rho = Z/A$. Portanto, a probabilidade p de que exista um terminal dentro da área de cobertura A_0 é dada por:

$$p = \frac{A_0}{A}. \quad (2.3)$$

Sendo N o número de vizinhos de um dado terminal, ou equivalentemente, o grau do terminal, o evento $\{N = k\}$ segue, portanto, uma distribuição binomial [13]:

$$P[N = k] = \binom{Z-1}{k} p^k (1-p)^{Z-1-k}. \quad (2.4)$$

Se a probabilidade p for muito menor que a unidade e o número de terminais Z for muito grande, a distribuição binomial se aproxima de uma distribuição de Poisson, resultando em:

$$P[N = k] = e^{-\lambda} \frac{\lambda^k}{k!}, \quad (2.5)$$

em que λ é o valor médio de N e vale $\lambda = (Z-1)p = \pi r_e^2 \rho$.

Portanto, a probabilidade de que o grau do terminal seja maior ou igual a um dado valor $k_{\min}$ é dada por

$$P[N \geq k_{\min}] = 1 - \sum_{j=0}^{k_{\min}-1} e^{-\lambda} \cdot \frac{\lambda^j}{j!}. \quad (2.6)$$

Por meio desta expressão é possível determinar a densidade de terminais mínima que garanta $P[N \geq k_{\min}]$ maior que um dado limiar.

Considere o exemplo de uma rede em que $r_e = 20$ m, $k_{\min} = 2$ e $A = 10^6$ m². Por meio de métodos numéricos, verifica-se que a densidade deve ser superior a 0,0038 terminais/m² para que $P[N \geq k_{\min}] = 0,95$. O gráfico a seguir confirma este resultado.

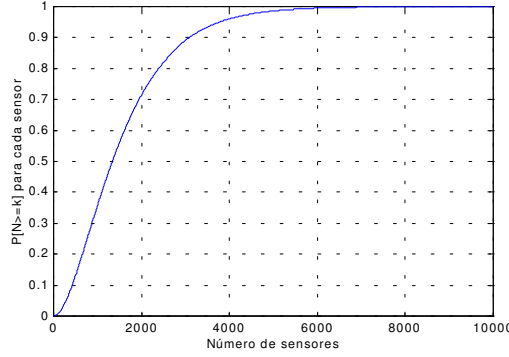


Figura 2.1: Probabilidade de enlace para grau de terminal $k \geq 2$.

2.3.2 Ambiente com Desvanecimento de Larga Escala

Um modelo de propagação rádio mais realista leva em conta, além da perda de percurso, as variações do valor médio da potência do sinal recebido devido às obstruções no caminho de propagação do sinal causadas por grandes objetos (sombreamento). Estas variações, quando expressas em decibéis, são geralmente modeladas como uma variável aleatória Gaussiana de média nula e desvio padrão σ [12]. O valor do desvio padrão depende do ambiente de propagação, mas, geralmente, está entre 4 e 6 dB. Portanto, a potência recebida, em decibéis, em um ponto distante r metros do transmissor é dada por

$$10\log(P_R) = 10\log(P_T) + 10\log(c) - 10n\log(r) + X, \quad (2.7)$$

em que X é uma variável aleatória Gaussiana de média nula e desvio padrão σ e as outras variáveis já foram introduzidas.

Para o caso de ambientes com apenas perda de percurso determinística, o terminal B será considerado um vizinho de um terminal A caso a distância entre A e B seja, no máximo, r_e . Na presença de desvanecimento, no entanto, o terminal B pode não ser um vizinho de A, mesmo que a distância entre ambos seja inferior a r_e , devido à variação do sinal recebido. Da mesma forma, um terminal C que esteja a uma distância de A maior que r_e pode ser um vizinho de A. Portanto, o evento {B é um vizinho de A} é aleatório com uma dada probabilidade.

Normalizando a distância r em relação a r_e , obtém-se a expressão [14]

$$10\log\left(\frac{P_R}{P_{R,\min}}\right) = -10n\log(\hat{r}) + X, \quad (2.8)$$

em que $\hat{r} = r/r_e$. Portanto, $10\log(P_R/P_{R,\min})$ é uma variável aleatória Gaussiana de média $-10n\log(\hat{r})$ e desvio padrão σ . Seja F um limiar acima do qual a potência recebida deve ser superior para que haja recepção correta (figura de ruído). Assim, tem-se:

$$10\log\left(\frac{P_R}{P_{R,\min}}\right) > F. \quad (2.9)$$

Então, a probabilidade de recepção correta $p(\hat{r})$ a uma distância $\hat{r}$ é dada por:

$$p(\hat{r}) = \Pr\left\{10\log\left(\frac{P_R}{P_{R,\min}}\right) > F\right\} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_F^\infty \exp\left\{-\frac{[t + 10n\log(\hat{r})]^2}{2\sigma^2}\right\} dt. \quad (2.10)$$

Seja a Função Erro dada por [26]:

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (2.11)$$

Fazendo $x = (t + 10n\log \hat{r})/(\sqrt{2}\sigma)$ e $dt = \sqrt{2}\sigma dx$, após algumas manipulações algébricas, encontra-se:

$$p(\hat{r}) = \frac{1}{2} \left(1 - \text{erf}\left(\frac{F}{\sqrt{2}\sigma} + 3,07 \frac{\ln \hat{r}}{\xi}\right) \right), \quad (2.11)$$

em que $\xi = \sigma/n$. Portanto, $p(\hat{r})$ é a probabilidade de estabelecimento de um enlace entre dois terminais separados por uma distância $\hat{r}$. Por este motivo, $p(\hat{r})$ é comumente chamado de *probabilidade de enlace*. A Figura 2.2 mostra a probabilidade de conectividade para diferentes valores de ξ , para os casos em que o limiar F de potência (em dB) vale 0dB, 2dB e 10dB. A curva para $\xi = 0$, corresponde ao ambiente onde apenas a propagação por perda de percurso está presente.

Conforme se pode notar através da Figura 2.2, à medida que a figura de ruído F aumenta, menores vão se tornando as chances de estabelecimento de enlace para todas distâncias. Isto está correto, uma vez que quanto maior o limiar de potência necessário para correta recepção, menor é a máxima distância possível entre dois terminais em que ainda se consegue estabelecer enlace. O caso em que $F = 0\text{dB}$ é o caso apresentado pelo trabalho [14].

Uma inspeção da Figura 2.2 confirma que a presença de desvanecimento no ambiente de propagação favorece, em média, o estabelecimento de enlaces de comprimento maior que r_e e, ao mesmo tempo, prejudica aqueles de comprimento menor que r_e . Conseqüentemente, o grau do terminal não pode mais ser caracterizado simplesmente como o número de terminais dentro da circunferência de raio r_e .

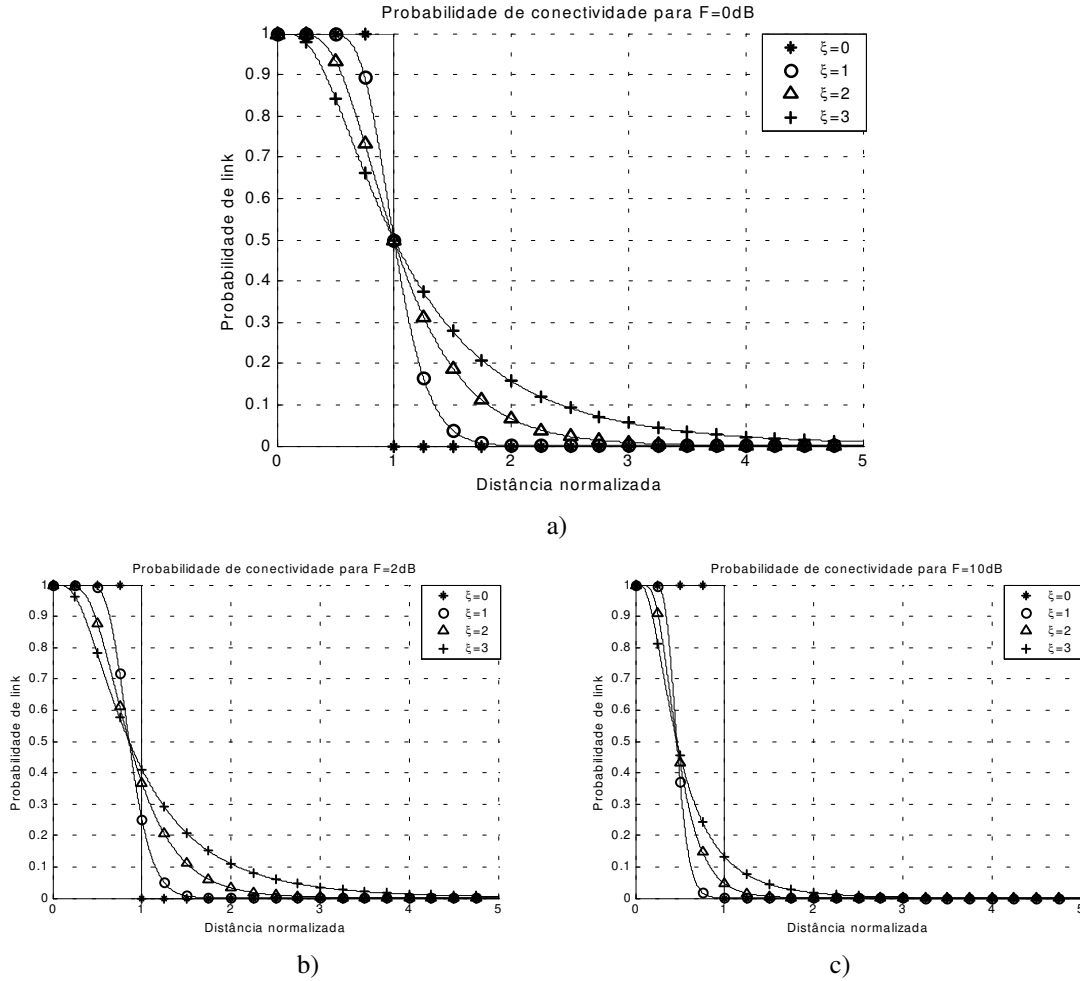


Figura 2.2: Probabilidade de enlace para vários valores de ξ e F : (a) $F = 0\text{dB}$, (b) $F = 2\text{dB}$ e (c) $F = 10\text{dB}$.

A caracterização do grau do terminal em ambientes com desvanecimento requer a função densidade de probabilidade $f_R(r)$ da distância entre transmissor e receptor condicionada à recepção correta. A função $f_R(r)$ pode ser obtida a partir de $p(\hat{r})$, ou, conforme proposto por Orris e Barton [17], a partir da caracterização da perda total de potência T_L imposta pelo canal. Este segundo procedimento será o empregado aqui. A função

$f_R(r)$ é obtida tal que a perda total de potência T_L observada por um receptor a uma distância r do transmissor seja inferior a l_1 , em que

$$T_L = k_0 + k_1 \ln(r) + S \text{ e } l_1 = \ln\left(\frac{P_{R,\min}}{P_T}\right). \quad (2.12)$$

Na expressão 2.12, S é uma variável aleatória Gaussiana de média nula e desvio padrão $\sigma_1 = 0,1\ln(10)\sigma$, $k_0 = \ln(c)$ e $k_1 = -n$. Pode-se mostrar que [17]

$$f_R(r) = 2rK \int_{-\infty}^{a-b\ln(r)} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-t^2/2} dt, \quad (2.13)$$

em que

$$K = \exp\left\{-\left(\frac{2}{k_1}\right)\left[l_1 - k_0 - \frac{\sigma_1^2}{k_1}\right]\right\}, \quad (2.14)$$

$$a = l_1 - k_0 - \frac{2\sigma_1^2}{k_1}, \quad (2.15)$$

$$b = k_1 / \sigma. \quad (2.16)$$

De posse da função densidade de probabilidade $f_R(r)$, pode-se verificar que (ver em [17] os detalhes) a distribuição de terminais vizinhos em uma ambiente com desvanecimento de larga escala ainda segue uma distribuição de Poisson (observadas as condições discutidas na Seção 2.3.1). O valor médio do número de vizinhos é dado por $\lambda = \rho \pi R_d^2$, em que R_d é o valor médio de r e vale [17]:

$$R_d = \exp\left[\frac{(l_1 - k_0)}{k_1} + \left(\frac{\sigma_1^2}{k_1^2}\right)\right]. \quad (2.17)$$

Usando as definições de l_1 , k_0 e k_1 na expressão de R_d , mostra-se que

$$R_d = r_e \times e^{\xi_1^2}, \quad (2.18)$$

onde

$$\xi_1 = \frac{0,1\ln(10)\sigma}{n} = 0,1\ln(10)\xi . \quad (2.19)$$

Portanto, o desvanecimento de larga escala provoca um aumento no alcance médio de cobertura, e este aumento é proporcional à razão entre o desvio padrão do desvanecimento e à perda de percurso. Como já discutido, o desvanecimento resulta em um ganho na probabilidade de estabelecimento de enlace entre terminais que estão a uma distância maior que r_e e uma perda àqueles que estão a uma distância menor que r_e . A expressão obtida de R_d mostra que, na média, apenas uma parcela deste ganho é compensado pela perda [17], fazendo com que o resultado final seja um aumento no raio médio de cobertura na presença de desvanecimento. Esta questão será discutida novamente mais adiante.

2.4 Análise Numérica

Para verificar os resultados apresentados acima, foram feitas algumas simulações de uma rede sem fio com e sem desvanecimento. Considerou-se uma rede com as características mostradas na Tabela 2.1, onde os valores adotados são de uma rede de sensores empregando o padrão IEEE 802.15.4 [18].

Parâmetro	Valor
Potência de transmissão	$P_T = -30$ dBm
Potência mínima de recepção	$P_{R,min} = -82$ dBm
Constante c	$c = 10^{-4}$
Expoente de perda de percurso	$n = 4$
Desvio padrão do desvanecimento	$\sigma = 6$ dB
Densidade de terminais	$\rho = 1$
Área total da rede	$A = 400$ m ²

Tabela 2.1: Parâmetros usados na simulação.

A simulação consistiu em fazer 10000 realizações para a determinação do número de terminais vizinhos a um terminal transmissor localizado na origem do sistema de coordenadas. As seguintes etapas são seguidas em cada realização:

1. $Z = \rho A$ terminais são distribuídos uniformemente em uma região de área A , com a origem do sistema de coordenadas coincidindo com o centro da região.
2. Determina-se o número N de terminais vizinhos ao terminal transmissor supostamente localizado na origem do sistema de coordenadas. Um terminal será considerado vizinho do transmissor se a potência recebida for superior a $P_{R,min}$.

Após as realizações, estima-se a distribuição de terminais vizinhos N . O mesmo procedimento é usado para os casos com e sem desvanecimento.

Com os valores da Tabela 2.1 resulta $r_e = 2$ m, $\xi_1 = 0,345$ e, conseqüentemente, $R_d = 2,25$ m. Considerando que o número de terminais da rede é 400, a probabilidade de existir um terminal na área de cobertura $A_0 = \pi r_e^2$ (para o caso sem desvanecimento) vale $p = 0,031$. Portanto, a distribuição binomial do número de vizinhos pode ser aproximada por uma distribuição de Poisson de valor médio $\lambda = 12,6$ terminais. Para o caso com desvanecimento, a probabilidade p vale 0,040 e o valor médio da distribuição de Poisson passa a valer 15,9 terminais.

A Figura 2.3 mostra as distribuições do número de vizinhos de um terminal obtidas por simulação e pela aproximação por uma distribuição de Poisson. Os resultados mostram que esta aproximação é adequada em ambos os casos, com e sem desvanecimento.

Considerando que a aproximação usando a distribuição de Poisson é válida, a Figura 2.4 compara as distribuições de terminais vizinhos sem e com desvanecimento para $\xi_1 = 0,230$ e $\xi_1 = 0,345$.

Como esperado, quando o valor do fator ξ_1 diminui, a influência do desvanecimento torna-se menor. Este comportamento pode ser explicado tendo em mente que o desvanecimento provoca, em média, um ganho aos terminais que estão a uma distância do transmissor maior que r_e (ou seja, estes terminais agora têm uma chance maior de estabelecer um enlace com o transmissor) e uma perda àqueles que estão a uma distância menor que r_e .

Dado que com o desvanecimento o alcance médio é sempre maior ou igual ao alcance sem desvanecimento, conclui-se que apenas uma parcela do ganho é compensada pela perda, como já discutido. No entanto, o ganho observado pelos terminais distantes diminui com o aumento do expoente de perda de percurso, pois a potência recebida por estes terminais cai

agora mais rapidamente. Desta forma, a diferença entre o ganho e a perda provocados pelo desvanecimento tende a zero com o aumento de n , ou diminuição de ξ_1 . Consequentemente, $R_d \rightarrow r_e$ e a influência do desvanecimento diminui.

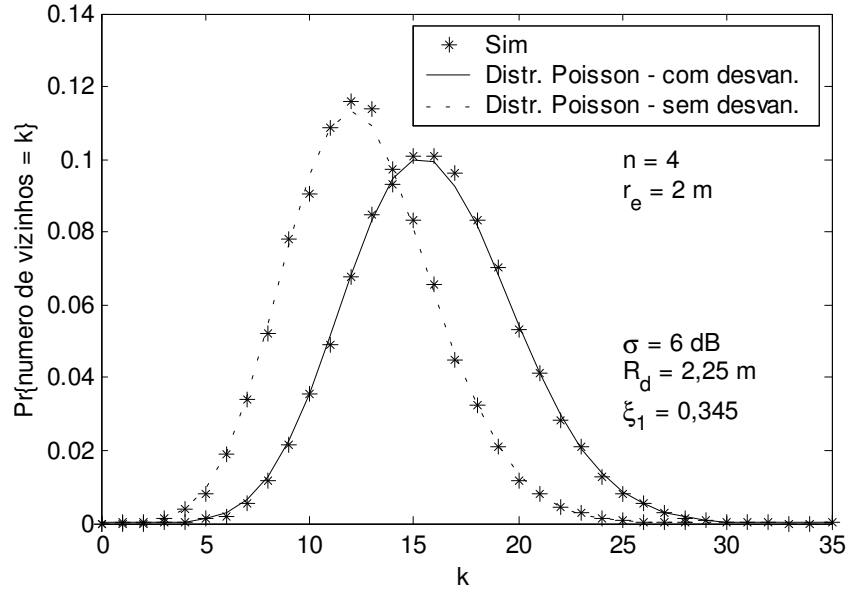


Figura 2.3: Distribuições do número de vizinhos de um terminal em ambientes com e sem desvanecimento.

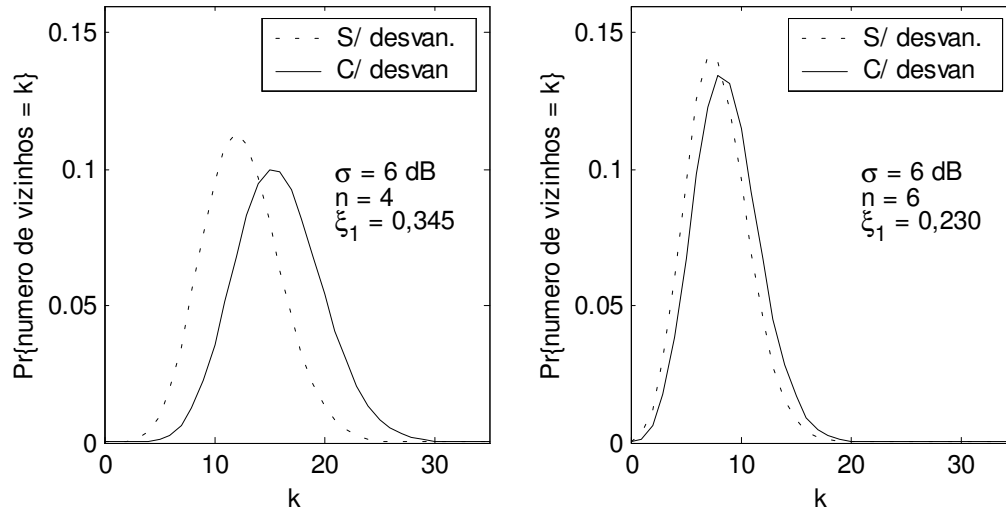


Figura 2.4: Distribuições de terminais vizinhos sem e com desvanecimento para $\xi_1 = 0,230$ e $\xi_1 = 0,345$.

Para ambientes de propagação encontrados comumente, o máximo valor de ξ_1 é próximo da unidade, o que corresponde a um ambiente com baixa perda de percurso (n pequeno) e grandes variações na potência do sinal recebido (σ grande). A Figura 2.5 mostra a

razão entre o raio médio de alcance com desvanecimento R_d e aquele sem desvanecimento r_e para ξ_1 entre 0 e 1.

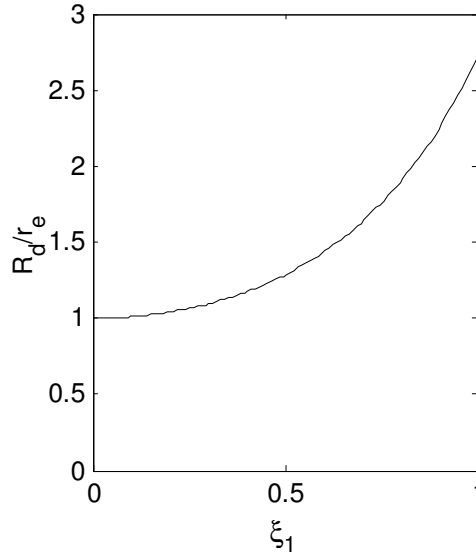


Figura 2.5: Razão entre o raio médio de alcance com desvanecimento R_d e aquele sem desvanecimento r_e para ξ_1 entre 0 e 1.

Portanto, o aumento do alcance médio de transmissão pode chegar a 150% do valor encontrado na ausência de desvanecimento. No entanto, um caso típico de ambiente de propagação com desvanecimento apresenta $\sigma = 6$ dB e $n = 4$, o que resulta em um aumento do alcance médio de apenas 12%.

2.5 Conclusão

Neste capítulo foram discutidas a conectividade de uma rede sem fio e algumas questões correlatas. Em particular, foi analisado o conceito de grau do terminal, sendo apresentadas modelagens deste parâmetro para ambientes de propagação com e sem desvanecimento. Por meio de simulação foi confirmado o comportamento poissoniano do grau do terminal, mesmo na presença de desvanecimento. Observou-se também que o grau do terminal aumenta na presença de desvanecimento e que este aumento depende da razão entre o desvio padrão do desvanecimento e o expoente de perda de percurso.

Capítulo 3

Eficiência de Informação Agregada

Um dos pontos mais importantes para o julgamento do desempenho das redes de sensores sem fio é a aferição da eficiência com que a mesma transporta os bits de informação.

Neste capítulo é proposto um modelo para sua obtenção baseado na criação de ares de silêncio. São levadas em conta as interferências provocadas por múltiplas transmissões simultâneas, as características do ambiente e da rede, da probabilidade de erro de pacote alvo e do esquema de modulação utilizado na sua operação.

Como será visto, a intensidade de perda de percurso pode ser o principal determinante na escolha do esquema de modulação a ser empregado.

3.1 Introdução

As redes *ad hoc* de múltiplos saltos ordinariamente empregam um canal de rádio singelo, de forma que o seu desempenho, na maioria das vezes, é limitado pela interferência co-canal. A probabilidade de sucesso na transmissão de um pacote (P_S) aumenta com a diminuição da distância d_{TR} entre o transmissor e o receptor de um enlace, graças ao aumento da potência do sinal desejado. Entretanto, a diminuição desta distância provoca o aumento do número de saltos que os pacotes têm que atravessar desde o terminal fonte até o destino, o que

aumenta o tráfego na rede. Por sua vez, este aumento no tráfego provoca o aumento do nível de contenção na rede, o que leva a uma diminuição da probabilidade de sucesso de transmissão de um pacote.

Estas particularidades do funcionamento de uma rede *ad hoc* de múltiplos saltos, além daquelas herdadas das redes sem fio mais conhecidas, fazem com que as tais redes exijam formas apropriadas de medidas de desempenhos.

Um conceito proposto para avaliar o desempenho de uma rede multihop é o da *capacidade de transporte*, criado por Kumar e Gupta em 2000 [19]. A capacidade de transporte de uma rede mede a sua eficiência em transportar uma dada quantidade de bits de informação a uma certa distância. Uma outra importante proposta de medida de desempenho foi feita por Kleinrock e Silvester na década de 70 [20]. Nesta proposta o desempenho é medido através do *progresso esperado η na direção do destino* (do inglês *Expected Forward Progress*), definido como a distância média percorrida por um pacote na direção do seu destino. Segundo este conceito, para uma dada densidade de terminais na rede, o raio de alcance dos terminais deve ser ajustado de forma a maximizar o progresso esperado. Em redes com alta densidade de terminais haverá, com alta probabilidade, um terminal vizinho na direção do terminal destino a uma distância d_{TR} do transmissor, de forma que o progresso esperado é dado pelo produto entre a distância d_{TR} e a vazão local ζ do enlace. Esta vazão local é definida como $\zeta = (1-p)(1-e^{-p})P_S$, em que p é probabilidade de um terminal transmitir um pacote [21].

O progresso esperado η na direção do destino, é, portanto, uma medida adequada para redes sem fio de múltiplos saltos, já que ela aumenta com o aumento da probabilidade de transmissão de um pacote, mas diminui com o aumento do número de saltos [22]. Entretanto, como mostrou Subbarao et al em [23], o progresso esperado η não leva em conta as diferenças na quantidade de informação transmitida quando esquemas diferentes de modulação e codificação (se houver) são empregados. Baseado nisso, Subbarao et al introduziu o conceito de *eficiência de informação IE*, definida como o produto do progresso esperado η e a eficiência espectral ε do sistema de transmissão, ou

$$IE = d_{TR} \cdot \varepsilon \cdot \zeta . \quad (3.1)$$

Em uma rede sem fio de múltiplos saltos, nem todos os enlaces de um salto estarão ativos ao mesmo tempo, mas apenas aqueles que estiverem separados por uma distância grande o suficiente para que a interferência co-canal possa ser suportada. Esta distância é chamada de *distância de reuso do canal*. Quanto maior for a razão sinal-interferência mínima necessária para se ter uma qualidade de enlace adequada, maior deverá ser a distância de reuso e, conseqüentemente, uma menor quantidade de enlaces poderá estar ativa simultaneamente, o que implica em menor eficiência no uso do canal.

Portanto, na avaliação do desempenho de uma rede sem fio deve-se levar em conta o número de enlaces simultaneamente ativos. Neste sentido, será introduzida neste capítulo uma medida de desempenho de rede de múltiplos saltos baseada na eficiência de informação como proposto por Subbarao, mas levando-se em conta a densidade de enlaces ativos. Esta medida de desempenho será denominada *eficiência de informação agregada* E da rede.

A análise apresentada neste capítulo utiliza uma modelagem baseada nos requisitos de relação sinal-interferência (SIR) dos enlaces, o que permite avaliar a influência de mecanismos de transmissão na eficiência da rede. É assumido que o ruído aditivo é desprezível quando comparado com a interferência co-canal. Assim, para um dado esquema de modulação e uma probabilidade de sucesso de transmissão de pacote alvo P_S , determina-se o valor mínimo de SIR admissível. O modelo desenvolvido é baseado na formação de regiões de silêncio em torno dos terminais receptores, como originalmente proposto por Olafsson em [24], de forma a garantir o atendimento dos requisitos de SIR para o enlace. A modelagem desenvolvida combina os conceitos de eficiência de informação e de região de silêncio, além daquele de reuso espacial de canal. Este modelo é usado para analisar a influência dos efeitos de propagação, de parâmetros da rede e do sistema de transmissão na eficiência agregada.

3.2 Modelagem da Rede Sem Fio

Será considerado o caso em que todos os terminais de uma rede sem fio de múltiplos saltos transmitem na mesma frequência (canal único), de forma que a transmissão em um dado enlace é considerada interferência para os outros enlaces. O desempenho da rede será medido por meio da sua eficiência em utilizar o meio rádio para transmitir bits de informação nos diversos enlaces da rede. Esta eficiência está relacionada com o número de enlaces ativos concorrentes, garantida a qualidade dos mesmos. Um enlace entre dois terminais será

considerado ativo se a relação sinal-interferência do sinal no terminal receptor deste enlace for maior que um dado valor limiar γ necessário para garantir que a probabilidade de sucesso de transmissão de pacote seja superior a um valor mínimo admissível $P_{S,\min}$. Será suposto que esta condição é observada se os terminais vizinhos ao receptor permanecerem inativos durante a transmissão naquele enlace, criando-se, assim, uma *região de silêncio* de raio R_S em torno do receptor. Portanto, cada enlace ativo corresponde a uma região de silêncio. A densidade de enlaces ativos será, portanto, proporcional ao número de regiões de silêncio na área total da rede.

Considere uma rede localizada em uma região de área A cujos terminais empregam um dado esquema de modulação para transmitir pacotes de tamanho L bits em uma faixa de frequência de largura B . O desempenho da rede será medido por meio da eficiência de informação agregada E , definida como

$$E = d_{TR} \times \varepsilon \times \rho_A \times (1 - P_{e,\text{pacote}}) \quad (3.2)$$

em que d_{TR} é a distância entre o transmissor e o receptor, ε é a eficiência espectral da modulação empregada, ρ_A é a densidade de enlaces ativos e $P_{e,\text{pacote}}$ é a probabilidade de erro de pacote máxima admissível.

Para estimar a densidade de enlaces ativos será suposto que todos os enlaces da rede são idênticos, ou seja, empregam a mesma modulação, têm a mesma distância d_{TR} e requerem a mesma probabilidade de erro de pacote $P_{e,\text{pacote}}$. Assim, para garantir $SIR \geq \gamma$, as regiões de silêncio em torno de cada receptor ativo terão a mesma área A_S . Supondo que as áreas de silêncio são disjuntas, então a densidade de enlaces ativos vale

$$\rho_A = \frac{\text{Número de enlaces ativos}}{\text{Área total da rede}} = \frac{N_a}{A} = \frac{1}{A_S} \quad (3.3)$$

A área da região de silêncio e, conseqüentemente, a eficiência da rede, dependerá de diversos fatores, como por exemplo, o limiar de SIR γ , a densidade de terminais e o expoente de perdas de percurso, como será discutido no decorrer deste capítulo. O limiar de SIR γ , no entanto, é chave na análise da eficiência da rede da forma como ela foi definida. Altas taxas de transmissão (e, conseqüentemente, alta eficiência) são conseguidas com esquemas de modulação que sejam eficientes no uso do espectro. No entanto, esquemas de modulação

eficientes requerem elevados valores de SIR para manter a probabilidade de erro de pacote abaixo de um dado limiar. De acordo com o modelo apresentado aqui, altos valores de SIR correspondem a grandes áreas de silêncio, o que reduz a eficiência da rede. Assim, é necessário investigar o compromisso entre a eficiência espectral da modulação e a eficiência da rede. Na seqüência, serão apresentados os detalhes da modelagem da rede, necessários para se estimar as grandezas envolvidas na eficiência. Antes, porém, são discutidos alguns pontos importantes da modelagem adotada.

A estimação do número de enlaces ativos como sendo a razão entre a área total da rede e a área da região de silêncio decorre da suposição que as regiões de silêncio são disjuntas. Esta é, de fato, uma suposição simplificadora, uma vez que um conjunto de terminais em silêncio pode pertencer a duas regiões de silêncio, o que invalida a suposição. No entanto, caso o modelo contemplasse regiões de silêncio não disjuntas, haveria uma maior quantidade de enlaces ativos (áreas de silêncio). Isto, entretanto, aumentaria a intensidade da interferência e, conseqüentemente, exigiria um aumento na área de cada região de silêncio necessária para atingir o limiar de SIR , reduzindo assim o número de enlaces ativos. Portanto, apesar de simplificadora, consideraremos que esta suposição não invalida os resultados finais.

A formação das áreas de silêncio em torno dos receptores ativos supõe a existência de um mecanismo adequado que controle a atividade dos terminais. Os detalhes deste mecanismo não são discutidos neste trabalho.

Modelo de Propagação

O modelo de canal de propagação empregado inclui apenas a perda de percurso determinística, com expoente de perda de percurso n . No entanto, será incluída neste modelo uma limitação superior para a potência de recepção [16] quando a distância de separação entre transmissor e receptor for inferior à distância de referência r_0 . Deste modo, a potência recebida P_R em um ponto distante r metros do transmissor é dada por:

$$P_R = \begin{cases} \frac{P_T \cdot c}{r^n}, & \text{se } r > r_0 \\ \frac{P_T \cdot c}{r_0^n}, & \text{se } r \leq r_0 \end{cases} \quad (3.4)$$

em que P_T é a potência de transmissão, suposta fixa e igual para todos os terminais, e c é uma constante que inclui todos os fatores comuns entre todos os enlaces, ou seja, ganhos das antenas transmissora e receptora, frequência de transmissão, etc.

Dado que o modelo de canal de propagação inclui apenas a perda de percurso determinística, a região de silêncio será circular, de área $A_s = \pi R_s^2$, em que R_s é o raio da área de silêncio em torno de um receptor ativo de forma a garantir uma probabilidade de sucesso de pacote superior a $P_{S,\min}$. Supondo que a região da rede é circular de raio R , então a densidade de enlaces ativos pode ser calculada como:

$$\rho_A = \frac{\pi R^2 / \pi R_s^2}{\pi R^2} = \frac{1}{\pi R_s^2} . \quad (3.5)$$

Distância transmissor – receptor

Serão considerados dois casos para a distância d_{TR} entre os terminais transmissor e receptor nesta análise: (i) o receptor está a uma distância arbitrária do transmissor e (ii) o receptor é o terminal vizinho mais próximo do transmissor.

1 – O receptor a uma distância arbitrária do transmissor

Neste caso, o receptor está a uma dada distância d_{TR} do transmissor. O objetivo da análise é verificar a influência desta distância no desempenho da rede. Será suposto que a densidade de terminais da rede é suficiente para existir, com alta probabilidade, um terminal a uma distância d_{TR} do transmissor.

2 – Receptor como vizinho mais próximo do transmissor

Neste caso, o transmissor seleciona o seu vizinho mais próximo como receptor, independentemente da posição deste em relação ao terminal destino final dos pacotes. Considerando que os terminais são distribuídos uniformemente com densidade ρ , pode-se mostrar que a distância entre um terminal e o seu vizinho mais próximo obedece uma densidade de probabilidade dada por [25]:

$$f_{\eta}(r) = 2\pi\rho \cdot r \cdot e^{-\pi r^2 \rho} \quad (3.6)$$

Portanto, a distância d_{TR} entre transmissor e receptor é o valor médio da distância entre o transmissor e seu vizinho mais próximo, ou seja

$$d_{TR} = E[r_1] = \int_0^\infty r \cdot f_{r_1}(r) dr = \frac{1}{2\sqrt{\rho}}. \quad (3.7)$$

Em geral, a escolha do terminal receptor deve levar em conta também a posição do terminal destino, ou seja, o terminal receptor deve ser escolhido de forma a garantir algum progresso no caminho entre a fonte e o destino. Assim, a suposição de que o transmissor estabelece enlace com o seu vizinho mais próximo é, certamente, uma simplificação na modelagem. No entanto, novamente aqui será assumido que a densidade de terminais da rede é suficiente para existir com alta probabilidade um terminal a uma distância d_{TR} do transmissor.

Limiar γ

O limiar γ de *SIR* depende da probabilidade de sucesso de pacote mínima aceitável, e dos esquemas de modulação e de codificação corretora de erros adotados. Este estudo será restrito à modulação *M*-PSK, sem codificação de erros. O limiar da razão sinal-interferência γ será aproximado pela razão sinal-ruído do sinal recebido, de tal forma que

$$\gamma \approx SNR = \frac{E_b}{N_0} \times \varepsilon. \quad (3.8)$$

Usando a definição de largura de banda como sendo a distância entre dois nulos no espectro, a eficiência espectral ε das modulações *M*-PSK é dada por

$$\varepsilon = \frac{\log_2 M}{2}. \quad (3.9)$$

O uso do código de Gray é usado para o mapeamento dos bits nos símbolos das modulações *M*-PSK, tal que para baixas probabilidades de erro de bit, a probabilidade de erro de símbolo pode ser dada por [26]:

$$P_{sim} \approx \left[1 - (P_S)^{1/L} \right] \times \log_2 M, \quad (3.10)$$

em que P_S é a probabilidade de sucesso de pacote. Na expressão acima, foi suposto que os erros de bit ocorrem uniformemente entre os L bits do pacote.

Portanto, para uma dada probabilidade de sucesso de pacote P_S , o limiar γ de SIR vale

$$\gamma = \frac{\log_2 M}{2} \left[\operatorname{erfc}^{-1} \left(2 \left(1 - P_S^{1/L} \right) \right) \right]^2, \text{ para BPSK} \quad (3.11)$$

$$\gamma = \frac{1}{2} \left[\frac{\operatorname{erfc}^{-1} \left((1 - P_S^{1/L}) \log_2 M \right)}{\sin(\pi/M)} \right]^2, \text{ para } M\text{-PSK}, M \geq 4. \quad (3.12)$$

3.3 Estimação do Raio da Área de Silêncio

O procedimento central para obtenção da eficiência da rede é o cálculo do raio de silêncio R_S . Este cálculo tem como base a relação sinal-interferência em um enlace arbitrário,

$$SIR = \frac{P_R}{I_T} \quad (3.13)$$

Em (3.13), P_R e I_T são as potências médias do sinal desejado e da interferência total, respectivamente. Contribuem para I_T todos os terminais transmissores fora da área de silêncio, de forma que I_T é uma função do raio R_S . Portanto, dado o limiar de SIR γ mínimo aceitável, determina-se o raio R_S mínimo necessário para garantir $SIR \geq \gamma$.

Considerando o modelo de perda de percurso adotado, a potência do sinal desejado no terminal receptor é dada por:

$$P_R = \begin{cases} \frac{P_T \cdot c}{d_{TR}^n}, & \text{se } d_{TR} > r_0, \\ \frac{P_T \cdot c}{r_0^n}, & \text{se } d_{TR} \leq r_0, \end{cases} \quad (3.14)$$

Dados o limiar γ , a potência P_T e a distância d_{TR} , estima-se a potência de interferência $I_{T,max}$ máxima permitida. A potência interferente I_T observada pelo terminal receptor de um dado enlace ativo é resultado da combinação dos sinais interferentes produzidos pelos terminais transmissores (dos outros enlaces ativos) que estão localizados fora da região de silêncio daquele receptor. O modelo adotado de canal de propagação com distância de referência requer um procedimento iterativo para determinar o valor do raio R_S a

partir da interferência $I_{T,max}$ máxima permitida. Este procedimento iterativo consiste em ajustar sucessivamente o valor de R_S até que a interferência total seja igual à máxima permitida. Assim, o procedimento é iniciado supondo que todos os terminais fora de uma área de silêncio inicial são interferentes, determinando-se o valor de R_S que garante $SIR \geq \gamma$. Com este valor inicial do raio de silêncio, a estimativa da interferência total resultante pode ser refinada, considerando que o número de terminais interferentes é igual ao maior número inteiro de regiões de silêncio $N_a = \left\lfloor (R/R_S)^2 \right\rfloor$. Com este novo valor de I_T , tem-se uma nova estimativa de R_S . Este procedimento é repetido iterativamente até a convergência do valor de R_S .

O cálculo de I_T é baseado no modelo apresentado na Figura 3.1. Todos os terminais localizados na área diferencial $dA = 2\pi x dx$ produzirão a mesma interferência individual, dada por:

$$I_i = \begin{cases} P_T c x^{-n}, & \text{se } x > r_0, \quad (a) \\ P_T c r_0^{-n}, & \text{se } x \leq r_0, \quad (b) \end{cases}, \quad (3.15)$$

onde x é a distância entre receptor e interferentes.

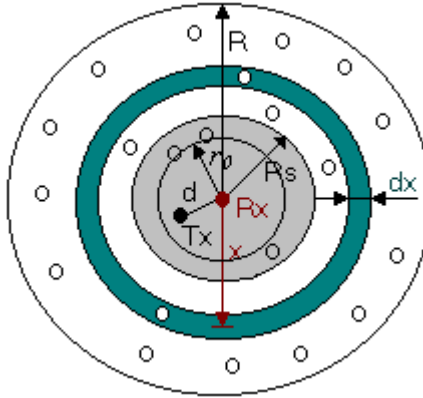


Figura 3.1: Modelo para o cálculo da interferência: Rx e Tx são os terminais receptor e transmissor.

O número de terminais interferentes dentro de dA depende da densidade de interferentes ρ_i , que, por sua vez, depende do número de regiões de silêncio na área da rede. Considerando que as potências individuais se combinam de maneira não coerente, de forma que a potência total da interferência é a soma das potências interferentes individuais, a interferência total é dada por:

$$I_T = \int_{R_s}^R 2\pi\rho_i I_i x dx. \quad (3.16)$$

O procedimento completo do cálculo de I_T depende da relação entre a distância TX–RX d_{TR} e a distância de referência r_0 , como discutido a seguir.

Caso 1: $d_{TR} > r_0$

Neste primeiro caso, é assumido que todos os terminais interferentes estão a uma distância do terminal receptor superior a r_0 . Consequentemente, o raio da região de silêncio também será superior a r_0 . Portanto, resolvendo a expressão (3.16), a interferência total é:

$$I_T = \frac{2\pi P_T c \rho_i}{n-2} (R_s^{2-n} - R^{2-n}) \quad (3.17)$$

para $n > 2$, e o valor da SIR é

$$SIR = \frac{(n-2)}{2\pi\rho_i d_{TR}^n (R_s^{2-n} - R^{2-n})} \quad (3.18)$$

Deve-se notar que a condição para o expoente de perda de percurso $n > 2$ não limita a abrangência dos resultados deste estudo, uma vez que esta condição é observada na maioria dos casos práticos de propagação.

O valor do raio da região de silêncio que garante $SIR \geq \gamma$ pode, finalmente, ser obtido a partir da expressão (3.18)

$$R_s = \left(\frac{n-2}{2\pi\rho_i \gamma d_{TR}^n} + R^{2-n} \right)^{1/(2-n)} \quad n > 2 \quad (3.19)$$

Portanto, o número de regiões de silêncio na área de serviço da rede é:

$$N_a = \frac{\pi R^2}{\pi R_s^2} = \left(\frac{R}{R_s} \right)^2. \quad (3.20)$$

Finalmente, a densidade *corrigida* de terminais interferentes, denotada como ρ_i^c , é,

$$\rho_i^c = \frac{N_a}{\pi R^2} = \frac{1}{\pi R_s^2}. \quad (3.21)$$

Com este novo valor de densidade de terminais interferentes, melhores estimativas da interferência total e do número de regiões de silêncio podem ser obtidas, substituindo ρ_i por ρ_i^c nas expressões (3.18) e (3.19). Este procedimento iterativo continua até a convergência do valor de R_S . Por fim, a densidade de enlaces ativos, que é igual à densidade de terminal interferentes, vale:

$$\rho_a = \frac{1}{\pi R_S^2}. \quad (3.22)$$

O procedimento descrito é sintetizado na Figura 3.2 a seguir:

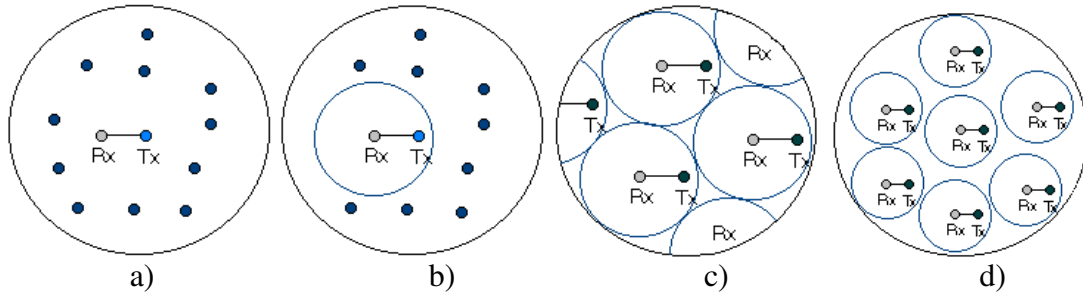


Figura 3.2: Ilustração do processo iterativo. Em a) um terminal receptor Rx tenta estabelecer um enlace com o terminal transmissor Tx e todos os outros agem como interferentes. Em b), a fim de manter um valor mínimo da SIR é criada a área de silêncio em torno de Rx. Em c), com o valor do raio de silêncio obtido, encontram-se quantas áreas de silêncio a rede comporta. Como o número de interferentes é igual ao número de regiões de silêncio, a interferência com as regiões de silêncio é menor, o que torna a SIR maior que a mínima necessária. O processo é repetido até a convergência de R_S , obtendo-se a quantidade final de transmissões simultâneas da rede, mostrada em d).

Caso 2: $d_{TR} \leq r_0$

Nesta situação, a potência do sinal desejado independe da distância entre transmissor e receptor e vale $P_R = P_T c r_0^{-n}$. Além disso, o raio de silêncio poderá resultar maior ou menor que a distância de referência, levando a dois procedimentos distintos para o cálculo da potência I_T .

Caso 2a: $R_S < r_0$

Neste caso haverá terminais interferentes cujas distâncias d até o terminal receptor são inferiores à distância de referência, e, portanto, suas potências interferentes individuais serão limitadas, de acordo com (3.15b). Para o restante dos terminais interferentes, a potência de

interferência será dada por (3.15a). Levando-se em conta estes dois casos no cálculo da interferência total I_T , através de (3.16), obtém-se:

$$I_T = \pi P_T c \rho_i \left[r_0^{2-n} - \frac{R_s^2}{r_0^n} + \frac{2}{n-2} (r_0^{2-n} - R^{2-n}) \right] \quad (3.23)$$

Usando (3.23), o valor de SIR é dado por:

$$SIR = \frac{n-2}{\pi \rho_i \left(r_0^2 - R_s^2 + \frac{2}{n-2} (r_0^2 - R^{2-n} r_0^n) \right)} \quad (3.24)$$

e, deste modo, o valor do raio da região de silêncio que garante $SIR \geq \gamma$ é dada por

$$R_s = \sqrt{r_0^2 + \frac{2}{n-2} (r_0^2 - R^{2-n} r_0^n) - \frac{1}{\rho_i \pi \gamma}}. \quad (3.25)$$

A partir deste ponto, utiliza-se o restante do procedimento iterativo apresentado no item anterior para se obter o valor de R_s convergido.

Caso 2b: $R_s > r_0$

Nesta situação todos os terminais interferentes se encontram além de r_0 e a interferência total I_T e a relação SIR são dadas por:

$$I_T = \frac{P_T c 2 \rho_i \pi}{n-2} (R_s^{2-n} - R^{2-n}) \quad (3.26)$$

$$SIR = \frac{(n-2)}{2\pi \rho_i r_0^n (R_s^{2-n} - R^{2-n})}. \quad (3.27)$$

Finalmente, o raio de silêncio em cada iteração é obtido por:

$$R_s = \left(\frac{n-2}{2\pi \rho_i \gamma r_0^n} + R^{2-n} \right)^{1/(2-n)}. \quad (3.28)$$

A partir deste ponto, o procedimento para a obtenção do valor final de R_s é idêntico ao já apresentado.

Deve-se notar que, no caso em que $d_{TR} \leq r_0$, não se sabe, a princípio, se o valor final de R_s resultará maior ou menor que r_0 . Uma forma de resolver esta indefinição é adotar uma

hipótese e seguir o procedimento (Caso 2a ou Caso 2b) correspondente. A hipótese será confirmada ou não de acordo com o valor final de R_S .

3.4 Resultados Numéricos

Nesta seção são apresentados resultados da análise da influência de diversos fatores na eficiência de informação agregada E de uma rede empregando modulação M -PSK. Será considerada uma rede de área total circular de raio $R = 100$ m, em que todos os terminais têm pacotes para transmitir. A distância de referência do modelo canal de propagação é fixada em $r_0 = 1$ m. Os outros parâmetros da rede são apresentados no decorrer da seção.

3.4.1 Distância Transmissor – Receptor Arbitrária

A Figura 3.3 mostra o raio da área de silêncio para diferentes valores de limiar de SIR e de expoente de perda de percurso, considerando densidade unitária.

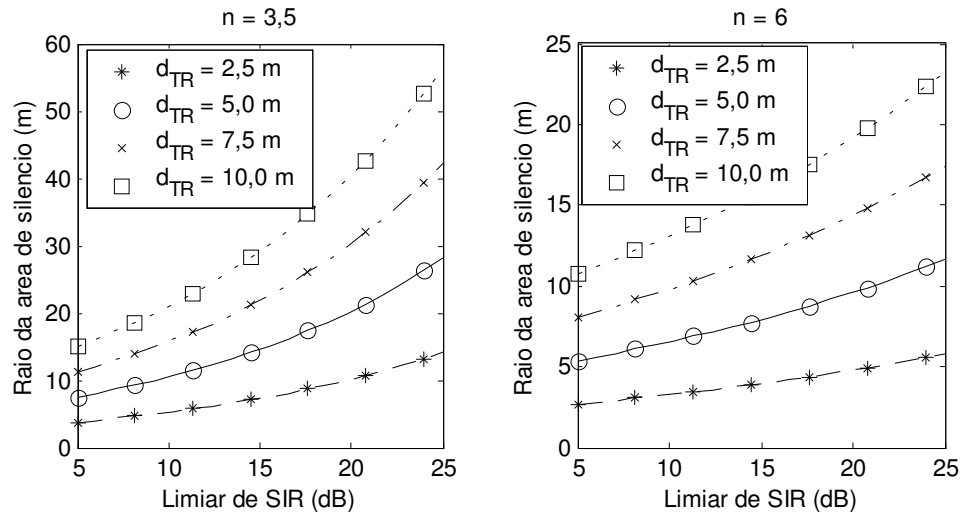


Figura 3.3: Raio de silêncio em função do limiar de SIR para expoente de perda de percurso igual a 3,5 e 6.

Como esperado, à medida que o limiar de SIR aumenta, o raio da área de silêncio necessária aumenta. Porém, quanto maior a distância de transmissão e menor o expoente de perda de percurso, mais acentuado é este aumento. Portanto, valores elevados de limiar SIR resultam em baixas densidades de enlaces ativos ρ_A , o que tende a reduzir a eficiência da rede. No entanto, enlaces operando com valores elevados de SIR podem utilizar esquemas de modulação com alta eficiência espectral (valores altos de M), o que tende a aumentar a

eficiência da rede. A análise a seguir visa avaliar o compromisso entre a eficiência espectral do esquema de modulação e os seus respectivos requisitos de *SIR*.

A Figura 3.4 mostra a densidade de enlaces ativos e a eficiência de informação agregada E da rede, calculada conforme a expressão (3.2), em função da distância d_{TR} para diversos esquemas de modulação. Os resultados mostrados são para probabilidade de erro de pacote $P_{e,pacote} = 1\%$, pacotes de $L = 1000$ bits e expoente de perda de percurso $n = 3,5$ e $\rho = 1$.

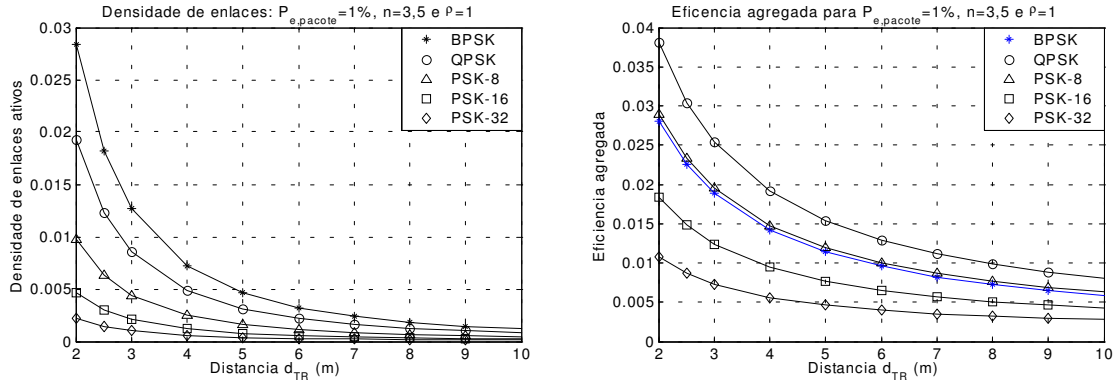


Figura 3.4: Eficiência de informação em função da distância de transmissão considerando diferentes esquemas de modulação e expoente de perda de percurso igual a $n = 3,5$.

Inicialmente, analisando a densidade de enlaces ativos, verifica-se que há uma diminuição da densidade de enlaces ativos com o aumento da distância de transmissão e que esta diminuição da densidade é mais expressiva que o aumento da distância. Isto ocorre porque à medida que a distância aumenta, a potência recebida do sinal desejado diminui, portanto havendo uma menor tolerância à interferência, o que implica na necessidade de áreas de silêncio maiores e, assim, menores densidades de enlaces ativos.

Quanto à eficiência agregada, devido à diminuição da densidade de enlaces ativos ser mais significativa que o aumento da distância, observa-se que o aumento da distância d_{TR} provoca a diminuição da eficiência E . Por definição, E é diretamente proporcional à distância d_{TR} . No entanto, o aumento de d_{TR} leva ao aumento do raio de silêncio R_s e, conseqüentemente, à diminuição da densidade de enlaces ativos ρ_A , que também afeta de maneira direta a eficiência E da rede. Portanto, o resultado da Figura 3.4 mostra que a influência da diminuição da densidade de enlaces ativos é preponderante no resultado final da eficiência. Em resumo, transmitir a longas distâncias não é vantajoso, pois resultará em um número reduzido de enlaces ativos.

Na Figura 3.5 analisam-se os mesmos parâmetros da Figura 3.4, mas considerando um expoente de perda de percurso $n = 6$.

Assim como ocorreu na Figura 3.4, o desempenho relativo entre os esquemas de modulação analisados não se altera com a variação de d_{TR} para um mesmo valor de expoente de perda de percurso. Por outro lado, o desempenho dos diferentes esquemas de modulação varia com o expoente de percurso. Como um exemplo, a Figura 3.4 mostra que a modulação 32-PSK leva ao pior desempenho da rede para $n = 3,5$, quando comparado a outros esquemas de modulação. Porém, quando o expoente de perda de percurso aumenta, o desempenho relativo da rede usando 32-PSK aumenta, conforme se verifica na Figura 3.5.

De uma forma geral, quanto maior for a atenuação do sinal provocada pelo canal de propagação, melhor é o desempenho de redes empregando esquemas de modulação mais eficientes (com muitos níveis M de modulação). Quanto maior for M , maior será a eficiência espectral, mas menor será a densidade de enlaces ativos, pois um maior limiar de razão sinal-interferência será necessário para uma comunicação adequada.

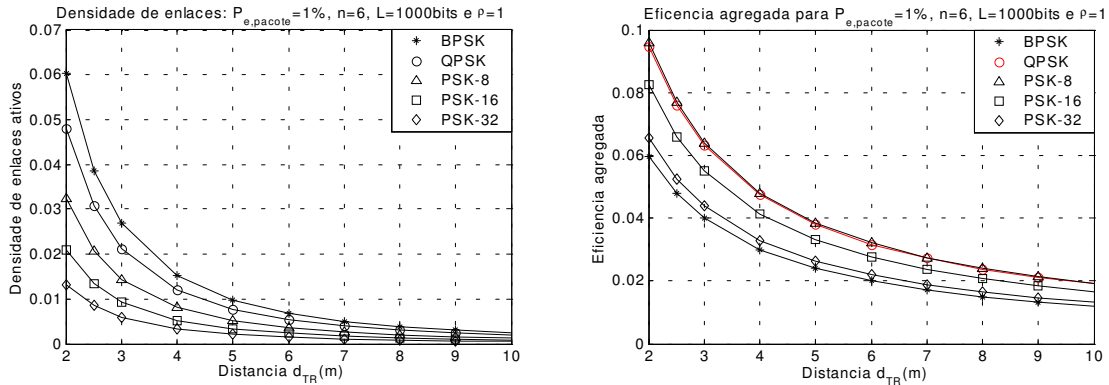


Figura 3.5: Eficiência de informação em função da distância de transmissão considerando diferentes esquemas de modulação e expoente de perda de percurso igual a $n = 6$.

O aumento do expoente de perda de percurso provoca uma diminuição no nível de interferência, o que reduz o raio da área de silêncio e aumenta a densidade ρ_A . No entanto, a taxa de incremento de ρ_A com n depende do esquema de modulação, como exemplificado na Figura 3.6 para os casos de BPSK e 16-PSK. Assim, a razão entre as densidades ρ_A resultantes de dois esquemas de modulação varia com n . Para o caso entre BPSK e 16-PSK, haverá um valor de n acima do qual a maior eficiência espectral do 16-PSK compensará a sua menor densidade ρ_A da rede, de forma que esta rede será mais eficiente que aquela

empregando BPSK. Assim, para $d_{TR} = 2,5\text{ m}$ e aproximadamente $n > 4,6$, passa a ser vantajoso usar o esquema de modulação 16-PSK.

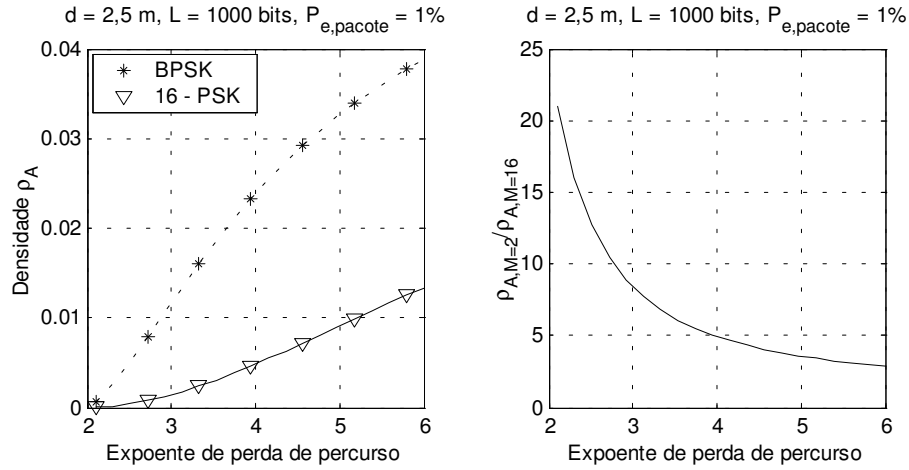


Figura 3.6: Densidade de terminais ativos para diferentes expoentes de perda de percurso e razão das densidades de terminais ativos entre BPSK e 16-PSK.

Para a faixa de valores de perda de percurso normalmente encontrada na prática ($2 \leq n \leq 6$), os resultados mostram que a maior eficiência da rede é obtida com o esquema QPSK, como ilustram as Figuras 3.7 e 3.8, independentemente da distância d_{TR} .

Pode-se notar por estas figuras que o esquema de modulação QPSK é o que apresenta o melhor balanço entre densidade de enlaces ativos e eficiência espectral, e por isso é o que possui o melhor desempenho nesta faixa considerada de expoentes de perdas de percurso.

A definição da eficiência de informação agregada E da rede vem ponderada pela probabilidade de sucesso de pacote $P_s = 1 - P_{e,\text{pacote}}$, ou seja, pela porcentagem de pacotes que são efetivamente aproveitados. Quanto maior a probabilidade de acerto P_s , maior será o limiar de SIR e, conseqüentemente, menor será a densidade de enlaces ativos ρ_A (ou, baixa eficiência de reuso espacial de canal), como mostrado na Figura 3.9.

No entanto, os resultados mostram que, até aproximadamente $P_s = 90\%$, a taxa de diminuição da densidade ρ_A é menor que a taxa de aumento de P_s na composição de eficiência E , conforme mostra também a Figura 3.9. A partir de $P_s = 90\%$, a densidade ρ_A cai mais rapidamente com o aumento de P_s . Para valores altos de P_s ou, equivalentemente, valores baixos de probabilidade de erro de pacote $P_{e,\text{pacotes}}$, a diminuição da densidade ρ_A torna-se preponderante e a eficiência da rede cai.

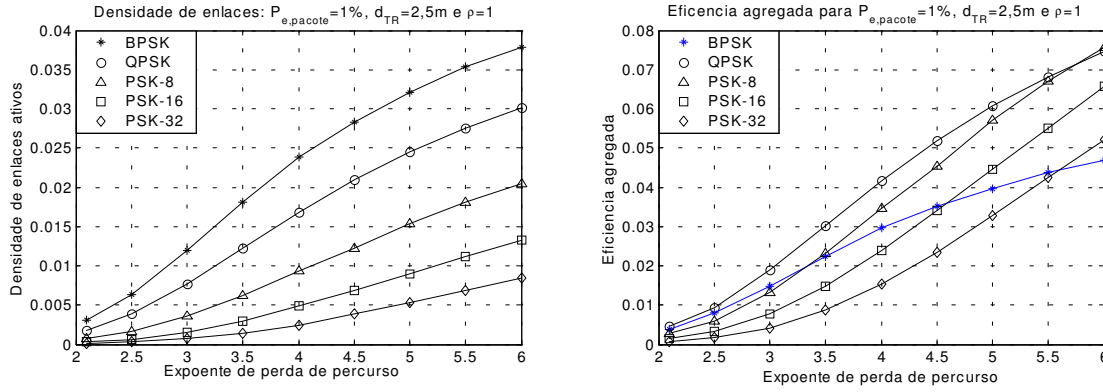


Figura 3.7: Eficiência de informação para diferentes n e $d_{TR} = 2,5m$.

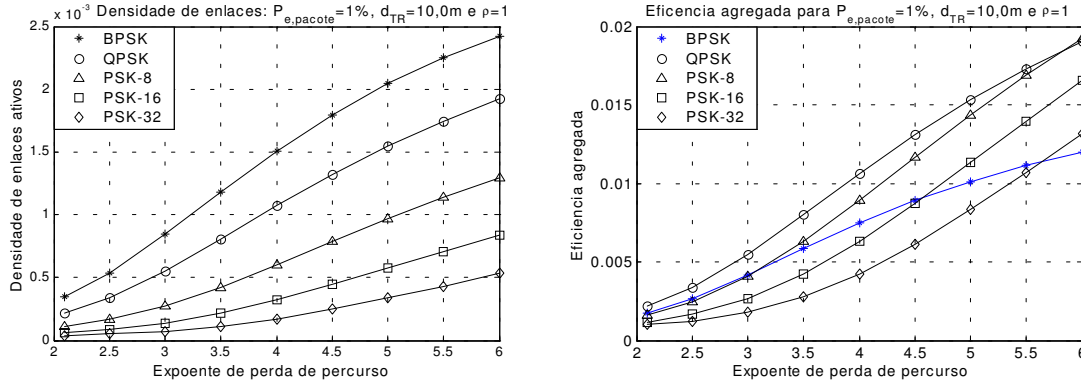


Figura 3.8: Eficiência de informação para diferentes n e $d_{TR} = 10,0m$.

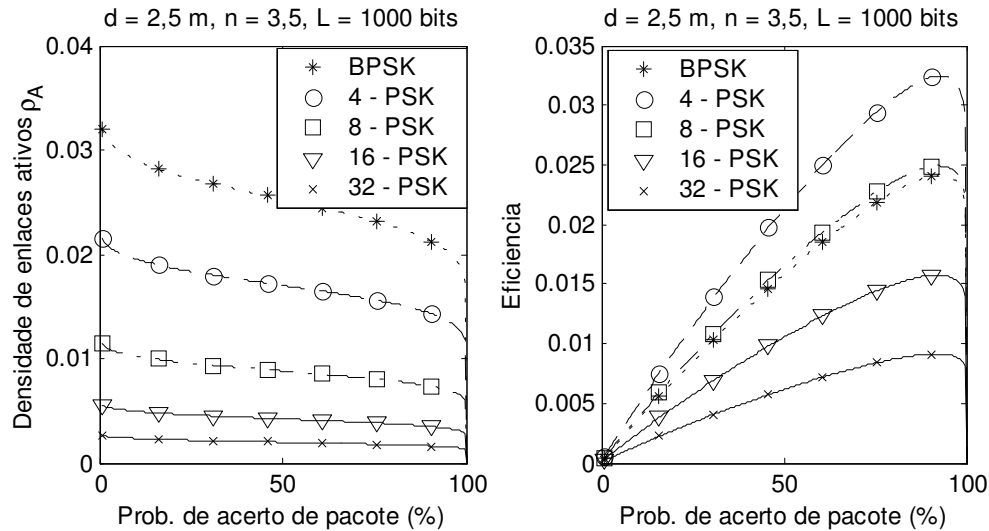


Figura 3.9: Densidade de enlaces ativos e eficiência para diferentes probabilidades de acerto de pacote.

A Figura 3.10 mostra a eficiência da rede, agora em função da probabilidade de erro de pacote $P_{e,pacote}$, para diferentes valores de expoente de perda de percurso. Esta figura mostra

que o comportamento da variação da eficiência E com a probabilidade $P_{e, pacote}$ não se altera com o expoente de perda de percurso.

Em resumo, os resultados mostram que a probabilidade de erro de pacote igual a 10% é o compromisso entre a eficiência de reuso de canal (expressa por meio da densidade ρ_A) e a eficiência no uso do canal para transmitir pacotes válidos.

Vale notar ainda que esta probabilidade de erro de pacote de compromisso possui mesmo valor para todos os esquemas de modulação considerados. O mesmo vale para diferentes níveis de atenuação do canal (como pode ser observado na Figura 3.10) e diferentes distâncias d_{TR} (observado em resultados não mostrados aqui).

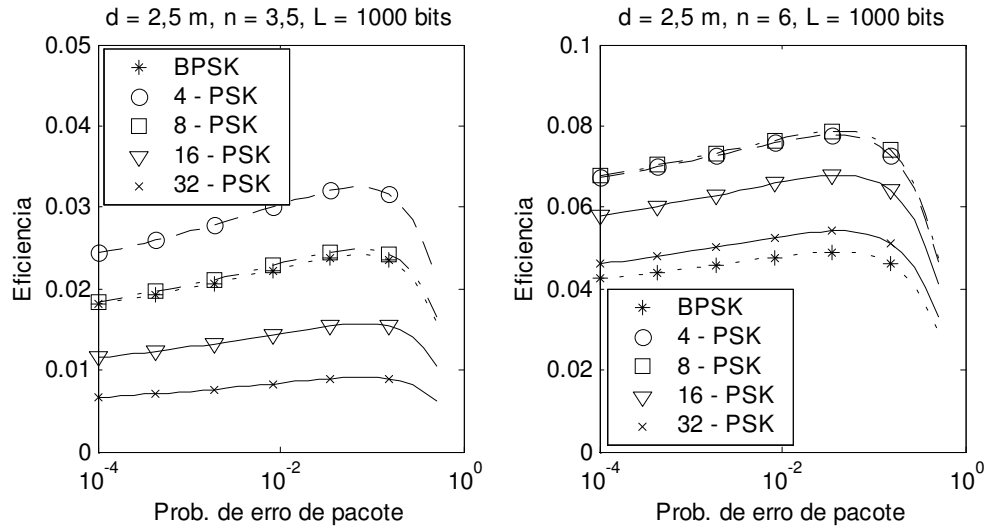


Figura 3.10: Eficiência de informação para diferentes probabilidades de erro de pacote e expoentes de perda de percurso.

Por fim, observa-se que esta probabilidade de erro de pacote de compromisso pouco depende do tamanho do pacote e do esquema de modulação, como mostra a Figura 3.11. Todavia, verifica-se que transmitir pacotes de tamanho menor é mais vantajoso que transmitir pacotes maiores. Isto ocorre devido ao fato que transmitir um pacote maior corretamente requer um gasto maior de energia, o que implica na necessidade de maiores áreas de silêncio e, conseqüentemente, menor densidade de enlaces ativos e menor eficiência agregada.

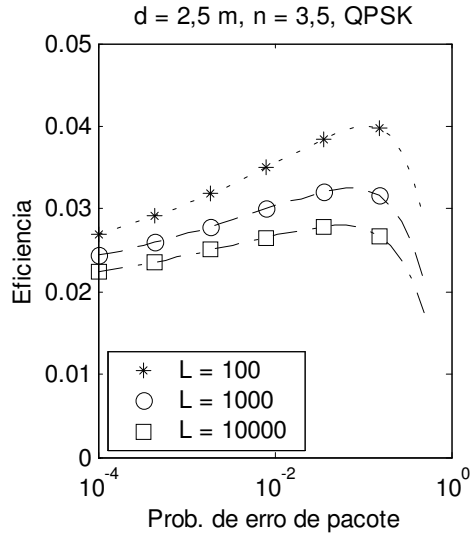


Figura 3.11: Eficiência para diferentes probabilidades de erro de pacote e tamanhos de pacotes.

3.4.2 Receptor como Vizinho mais Próximo

Nesta seção será analisado o caso em que o terminal transmissor estabelece o enlace com o seu vizinho mais próximo. Portanto, a distância d_{TR} diminui com o aumento da densidade de terminais ρ e, supondo que os terminais são distribuídos uniformemente na área da rede, tem-se que $d_{TR} = \frac{1}{2\sqrt{\rho}}$.

A diminuição da distância d_{TR} provoca efeitos opostos na eficiência da rede. Primeiro, a redução da distância tende a reduzir a eficiência da rede, pois os pacotes serão transmitidos a uma menor distância. Por outro lado, valores menores de d_{TR} aumentam a potência do sinal recebido, o que diminui o valor de R_S e permite uma maior densidade de enlaces ativos, aumentando, assim, a eficiência. O resultado combinado destes efeitos é mostrado na Figura 3.12.

Entretanto, um efeito adicional aparece quando a densidade de terminal cresce de tal forma que a distância d_{TR} diminui abaixo da distância de referencia r_0 : conforme o modelo de propagação adotado, para distância d_{TR} abaixo de r_0 , a potência recebida do sinal desejado independe da distância de recepção. A Figura 3.12 mostra o resultado combinado

destes efeitos na densidade de enlaces ativos e da eficiência da rede, para $n=3,5$ e $P_{e,pacote} = 1\%$.

Conforme se pode verificar, quando se aumenta a densidade de terminais até $\rho = 0,25$ (o que corresponde a $d_{TR} = r_0$), não há o efeito da limitação da potência de recepção, e a eficiência da rede cresce com o aumento da densidade (ou, equivalentemente, com a diminuição da distância d_{TR}). Para densidades maiores que $\rho = 0,25$, a potência do sinal recebido é limitada, de forma que a densidade de enlaces ativos permanece fixa. Desta forma, a eficiência passa a diminuir com a densidade de enlaces devido à conseqüente diminuição da distância d_{TR} .

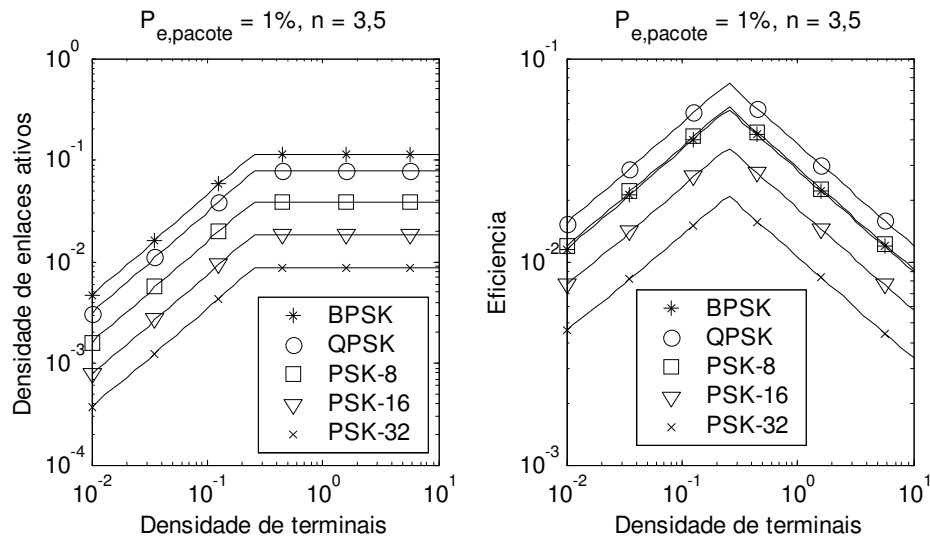


Figura 3.12: Densidade de enlaces ativos e Eficiência para diferentes densidades de terminais.

3.5 Conclusões

Este capítulo apresentou uma modelagem de uma rede *ad hoc* de canal singelo, com a qual foi possível avaliar os efeitos de diversos parâmetros da rede na sua eficiência de informação agregada para duas situações: na primeira, a transmissão ocorre a distâncias arbitrárias, enquanto que na segunda o transmissor estabelece um enlace com o seu vizinho mais próximo. Em ambas estratégias, esta modelagem é baseada na formação de regiões de silêncio em torno dos receptores como uma forma de garantir o atendimento dos requisitos de *SIR* do enlace transmissor – receptor.

Observou-se que a atenuação provocada pelo canal no sinal recebido tem grande influência na eficiência e na escolha do esquema de modulação que a maximiza. Os resultados mostram que se o canal de propagação provocar forte atenuação no sinal transmitido e, portanto, na interferência observada por um receptor, esquemas de modulação com mais níveis de modulação fornecem maior eficiência, apesar destes esquemas requererem maior energia de bit para uma dada probabilidade de erro de pacote.

Para distância d_{TR} arbitrária foi visto que transmitir os pacotes utilizando pequenas distâncias é mais eficiente do que fazê-lo usando grandes distâncias. Isto ocorre porque, a distâncias maiores, a potência recebida do sinal desejado diminui, fazendo com que um raio de silêncio maior seja necessário, implicando numa menor densidade de enlaces ativos. A eficiência é função tanto da distância de transmissão quanto da densidade de enlaces ativos, mas como o efeito preponderante é a diminuição da densidade de enlaces ativos, ela é menor quando distâncias maiores de transmissão são empregadas.

Foi visto ainda que quando a probabilidade de sucesso de pacotes aumenta até 90%, ocorre um aumento da eficiência, pois nestes casos o aumento desta probabilidade é mais relevante que a diminuição da densidade causada pelo maior limiar de SIR exigido. Entretanto, a partir de 90%, a diminuição da densidade torna-se preponderante e a eficiência decresce rapidamente com o aumento da probabilidade de acerto de pacote.

Com relação à estratégia de se transmitir para o vizinho mais próximo, foi verificado também que a eficiência é degradada com o aumento da densidade de terminais quando ela implica em distâncias de transmissão inferiores a distância de referência, pois, nestes casos, a diminuição da distância entre transmissor e receptor não mais implica no aumento da potência do sinal desejado (há a limitação de potência) e a densidade de enlaces ativos permanece constante. Entretanto, a eficiência é função de ambos parâmetros e, por isso, diminui com o aumento da densidade da rede.

Capítulo 4

Modelagem Alternativa Para a Eficiência de Informação Agregada

Neste capítulo propõe-se um modelo para se mensurar o desempenho da rede baseando-se, também, na eficiência de informação agregada. Entretanto, diferentemente do capítulo anterior, não se supõe mais a existência de áreas de silêncio em torno dos terminais receptores e, além disso, os resultados são obtidos através de simulação, conforme descrito.

4.1 Introdução

No capítulo anterior foi introduzido o conceito de eficiência de informação agregada para mensurar o desempenho de uma rede sem fio de múltiplos saltos. A eficiência de informação agregada leva em conta a eficiência espectral do enlace de um salto, bem como a distância percorrida pelo pacote e a eficiência com que o canal rádio é reutilizado

espacialmente. Além disso, a rede sem fio foi modelada supondo a formação de áreas de silêncio em torno dos terminais receptores dos enlaces ativos.

Neste capítulo a eficiência de informação agregada de uma rede de múltiplos saltos será reavaliada, sem, no entanto, supor a existência das tais áreas de silêncio. A modelagem do funcionamento da rede adotada neste capítulo será baseada na suposição de que enlaces de um salto estarão concorrentemente ativos se a relação sinal-interferência nos seus receptores estiver acima de um certo limiar γ . Assim, o número máximo de enlaces ativos é uma indicação da capacidade de escoamento de tráfego da rede e da habilidade da rede em reutilizar o canal espacialmente: um ρ_A pequeno significa que uma grande distância de reuso é requerida para satisfazer a condição $SIR > \gamma$ em todos os enlaces ativos. O número de enlaces ativos N_A , ou sua densidade ρ_A , depende de fatores como o esquema de modulação adotado, a distância d_{TR} entre transmissor e receptor, as condições de propagação, a qualidade de enlace desejada, a densidade de terminais na rede ρ e da posição dos terminais na rede. Supondo que os terminais são distribuídos aleatoriamente na região da rede, conclui-se que N_A é uma variável aleatória. A dificuldade do desenvolvimento de uma modelagem analítica para extrair a densidade ρ_A motivaram o uso de métodos de simulação neste capítulo. Assim, dadas as características da rede sem fio, a sua eficiência de informação agregada E , dada pela equação (3.2) e aqui repetida por comodidade,

$$E = d_{TR} \times \varepsilon \times (1 - P_{e, \text{pacote}}) \times \rho_A, \quad (4.1)$$

é calculada. Como no capítulo anterior, $P_{e, \text{pacote}}$ é a probabilidade de erro de pacote adotada, ε é a eficiência espectral do esquema de modulação empregado e ρ_A é a densidade de enlaces ativos, determinada por meio de simulação. Uma vez que os terminais são distribuídos aleatoriamente pela rede, d_{TR} é a distância média entre transmissor e receptor.

A seguir são apresentados detalhes da modelagem da rede sem fio e do procedimento de simulação, seguidos pelos resultados numéricos.

4.2 Modelagem da Rede Sem Fio com Múltiplos Saltos

4.2.1 Modelo de Canal de Propagação

É assumido um modelo de canal de propagação determinístico, com expoente de perda de percurso n e limitação de potência de recepção, tal que a potência média P_R do sinal recebido em um ponto distante r metros do transmissor é dada por (3.4).

Um terminal j é considerado um vizinho do terminal i se a potência do sinal transmitido por i e recebida por j for superior a um dado limiar $P_{R,\min}$. De acordo com o modelo de canal de propagação acima, todos os terminais vizinhos do terminal i estão dentro de uma região circular de raio igual ao alcance de transmissão r_e , como mostra a Figura 4.1, onde r_e é dado por (2.2).

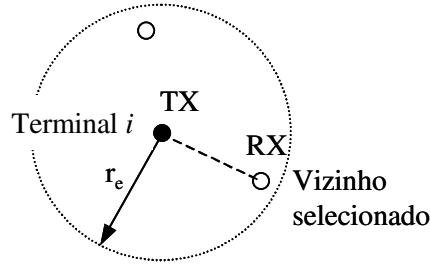


Figura 4.1: Par transmissor-receptor.

Assume-se, ainda, que o transmissor seleciona o seu vizinho mais distante para enviar o seu pacote, independentemente da direção deste receptor em relação ao destino final do pacote. Portanto, a distância transmissor-receptor de um enlace (um salto) é menor que r_e , mas se aproxima de r_e quando a densidade de terminais na rede aumenta.

4.2.2 Modelo de Operação da Rede

É assumido que Z terminais (transmissores ou receptores) são uniformemente distribuídos em uma área quadrada de tamanho A m², resultando em uma densidade de terminais de $\rho = Z/A$ terminais/m². É suposto que os terminais sempre têm pacotes a transmitir. Além disso, é assumida uma operação *half-duplex* (isto é, terminais não podem transmitir e receber ao mesmo tempo) e que a rede opera em um canal singelo.

Um dado terminal transmissor i tentará estabelecer um enlace com o seu vizinho mais distante. Entretanto, um enlace entre um terminal i e seu vizinho j estará ativo somente se a

razão sinal-interferência em j (SIR) e nos demais terminais receptores dos enlaces ativos estiverem acima de um dado limiar γ , isto é:

$$SIR_j = \frac{P_T r_{ij}^{-\alpha}}{\sum_{\substack{k \in U_T \\ k \neq i}} P_T r_{kj}^{-\alpha}} > \gamma, \text{ para todo } j \in U_R, \quad (4.2)$$

onde r_{ij} é a distância de separação entre o transmissor i e seu correspondente receptor j , e U_R e U_T são os conjuntos de terminais receptores e transmissores, respectivamente. Portanto, somente uma fração dos enlaces possíveis estará ativa em um dado momento, enquanto que todos os demais enlaces permanecerão em silêncio.

Assim, a densidade de enlaces ativos ρ_A é a quantidade máxima de enlaces por unidade de área tal que a SIR nos terminais receptores de todos enlaces ativos esteja acima de γ .

Neste estudo, o limiar γ é determinado de acordo com o esquema de modulação utilizado, da mesma forma como foi feito no Capítulo 3. A análise será restrita às modulações M -PSK com detecção coerente, sem codificação corretora de erros. Assumindo que o ruído aditivo é desprezível e que o desempenho é limitado pela interferência, isto é, $SNIR \approx SIR$, então o limiar γ é dado pelas equações (3.11) e (3.12), conforme o número de níveis de modulação.

4.2.3 Procedimento de Simulação

O procedimento de simulação descrito neste seção objetiva a determinação da densidade de enlaces ativos ρ_A . Para uma dada densidade de terminais ρ , raio de transmissão r_e , esquema de modulação, eficiência espectral ε , probabilidade de erro de pacote P_{e_pacote} , expoente de perda de percurso n , o seguinte procedimento de simulação foi usado:

1. $Z = \rho A$ terminais são uniformemente distribuídos em uma área de $A \text{ m}^2$;
2. Cada terminal identifica seus vizinhos (conforme descrito na seção 4.2.1) e forma um par transmissor – receptor com o vizinho mais distante que esteja disponível, se houver. É importante notar que nem todos os terminais encontrarão um vizinho para formar um par, ou porque todos os seus vizinhos já foram escolhidos por outros

terminais, ou porque o terminal encontra-se isolado (isto é, o terminal não tem vizinhos). Os pares de terminais formados nesta etapa são considerados potenciais *enlaces ativos*. Note-se que nesta etapa não é verificada a qualidade do enlace, e os pares são formados apenas com base na distância d_{TR} .

3. Os potenciais enlaces ativos são, então, ativados um a um. Seguindo o modelo de rede descrito acima, um enlace é ativado se e somente as razões *SIRs* observadas nos terminais receptores de todos os terminais concorrentes estiverem acima do limiar γ pré-estabelecido. Ao final esta etapa, ter-se-á o conjunto de enlaces ativos para aquela realização de posição de terminais. O número de enlaces ativos determina a densidade ρ_A .

Este procedimento é repetido J vezes para o mesmo cenário (definido pelo conjunto de parâmetros da rede e do sistema de transmissão) a fim de remover os efeitos de uma realização particular das posições dos terminais. Desta forma, ao final ter-se-á um conjunto de J amostras, com o qual calcula-se o valor médio ρ_A para aquele conjunto de parâmetros da rede. Um exemplo de realização da simulação encontra-se na Figura 4.2.

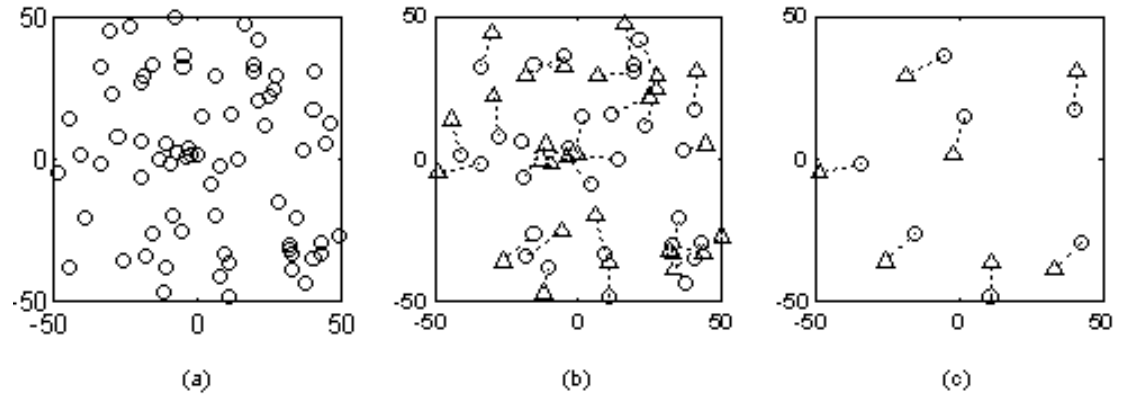


Figura 4.2: Exemplo de realização da simulação: (a) Terminais estão uniformemente distribuídos; (b) Cada terminal se junta com seu vizinho mais distante disponível; (c) Os enlaces são ativados, tal que a condição $SIR \geq \gamma$ seja observada em todos receptores ativos. Transmissores e receptores são indicados por triângulos e círculos, respectivamente.

4.3 Resultados numéricos

Nessa seção são apresentados e analisados alguns resultados numéricos para alguns cenários representativos caracterizados pelos parâmetros fixados mostrados na Tabela 4.1.

Será considerada apenas a modulação M -PSK, sem codificação corretora de erros. Para cada cenário foram geradas 100 realizações.

Parâmetro	Extensão
Densidade de terminais na rede (ρ)	$0 < \rho < 0,2$
Área da rede (A)	10^4 m^2
Expoente de perda de percurso (n)	$2 \leq n \leq 4,5$
Alcance de transmissão (r_e)	$2,5 \leq r_e \leq 10 \text{ m}$
Máxima probabilidade de erro de pacote aceitável($P_{e,pa \text{ cot } e}$)	$P_{e,pa \text{ cot } e} = 0,1\%$

Tabela 4.1: Configuração de parâmetros do cenário.

4.3.1 Densidade de enlaces ativos

Esta seção apresenta uma análise do comportamento da densidade de enlaces ativos em função de diversos parâmetros da rede. As Figuras 4.3(a) e 4.3(b) mostram a densidade de enlaces ativos ρ_A em função da densidade de terminais ρ na rede, para expoente de perda de percurso $n = 3,5$. Na Figura 4.3(a) está mostrada a relação $\rho_A \times \rho$ para diferentes valores de alcance de transmissão r_e , enquanto que 4.3(b) mostra esta relação para diferentes esquemas de modulação.

Observa-se que para uma pequena densidade de terminais, o número de enlaces ativos aumenta quase que linearmente com o número de terminais da rede, até o ponto em que mais nenhum enlace pode ser ativado na rede, isto é, a rede atinge a saturação em termos de número de enlaces ativos. É interessante notar que, após aquele ponto, é observada uma leve diminuição na densidade de enlaces ativos com o aumento de ρ . Isto ocorre devido ao fato de que a distância média entre um terminal transmissor e o seu terminal vizinho mais distante aumenta com o aumento da densidade de terminais, como mostra a Figura 4.4. O aumento da distância média d_{TR} provoca uma diminuição na potência do sinal recebido, o que leva a uma densidade de enlaces ativos menor para atender $SIR > \gamma$ em todos os enlaces ativos.

Retornando às Figuras 4.3(a) e 4.3(b), ali estão mostrados os primeiros resultados quantitativos deste estudo. A Figura 4.3(a) mostra que o aumento da distância de transmissão reduz a densidade de enlaces ativos, isto é, menos terminais podem transmitir ao mesmo

tempo. A razão para isso é que o aumento da distância de transmissão (tendo em mente que o receptor é o vizinho mais distante possível dentro do alcance de cobertura do transmissor), faz a potência recebida do sinal desejado diminuir, reduzindo, assim, a máxima quantidade de interferência permitida para manter $SIR > \gamma$ e, conseqüentemente, a densidade ρ_A . De acordo com a definição da eficiência de informação agregada E , o aumento de d_{TR} tende a aumentar diretamente a eficiência, porém tende também diminuí-la de forma indireta por meio da diminuição de ρ_A . Na próxima seção será analisado este compromisso.

A Figura 4.3(b) mostra que o uso de um número maior de níveis de modulação reduz a densidade de terminais ativos, pois uma maior quantidade de níveis de modulação suporta menores níveis de potência de interferência para alcançar uma dada probabilidade de sucesso de pacote. Assim, o aumento do número de níveis de modulação leva a menores valores de densidade ρ_A . Por outro lado, esquemas de modulação de muitos níveis de modulação são mais eficientes no uso do espectro, surgindo outro compromisso na composição da eficiência da rede, que será analisado mais adiante.

Outros fatores influenciam de forma relevante a densidade de enlaces ativos. Os resultados mostrados nas Figuras 4.3 demonstram que o raio de transmissão desempenha um importante papel no desempenho da rede. Por exemplo, a densidade de enlaces ativos decresce rapidamente com o aumento do raio de transmissão, como se pode ver na Figura 4.5 para vários esquemas de modulação.

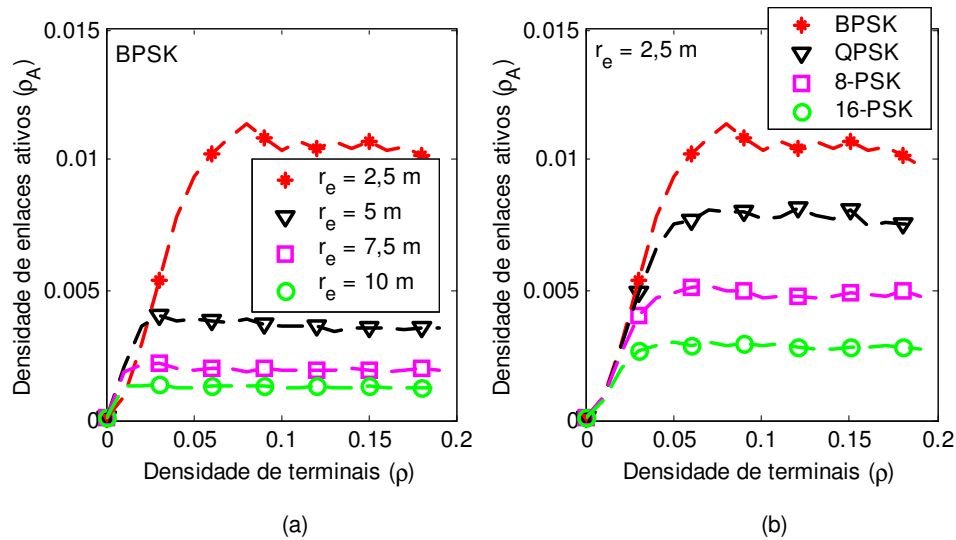


Figura 4.3: Densidade de enlaces ativos em função da densidade de terminais, para expoente de perda de percurso $n = 3,5$. (a) Modulação BPSK e diferentes distâncias de transmissão; (b) Distância de transmissão de 2,5m e diferentes esquemas de modulação.

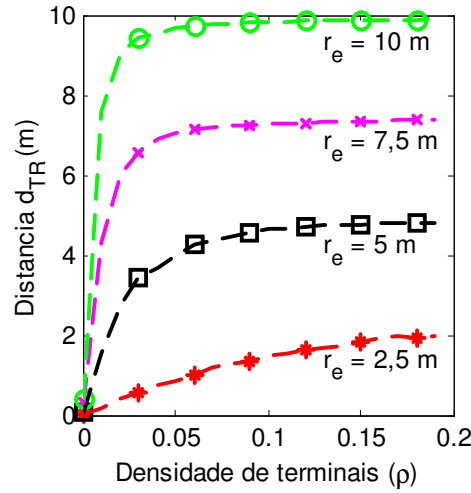


Figura 4.4: Distância média de separação entre transmissor e receptor (d_{TR}) em função da densidade de terminais para diferentes valores de alcance de transmissão. Transmissor escolhe seu vizinho mais distante como seu receptor.

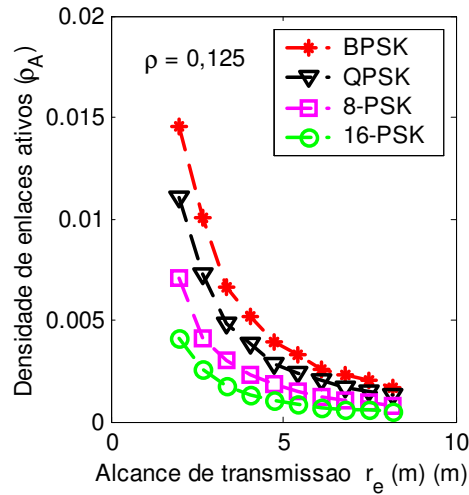


Figura 4.5: Densidade de enlaces ativos em função da distância de transmissão para expoente de perda de percurso 3,5 e diferentes esquemas de modulação.

A densidade de enlaces ativos é também afetada pelo expoente de perda de percurso, conforme mostrado na Figura 4.6. Grandes valores de expoente de perda de percurso produzem uma forte atenuação dos sinais, permitindo menores distâncias de reuso, ou, equivalentemente, aumentando o número de enlaces ativos.

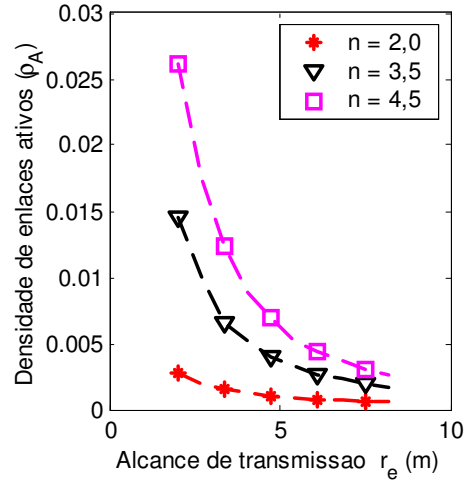


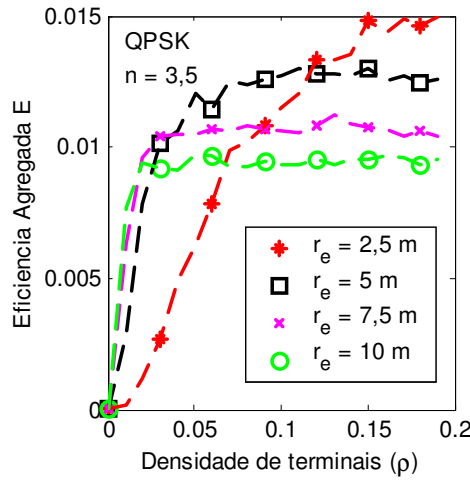
Figura 4.6: Densidade de enlaces ativos x raio de transmissão para diferentes expoentes de perda de percurso.

4.3.2 Eficiência de Informação Agregada

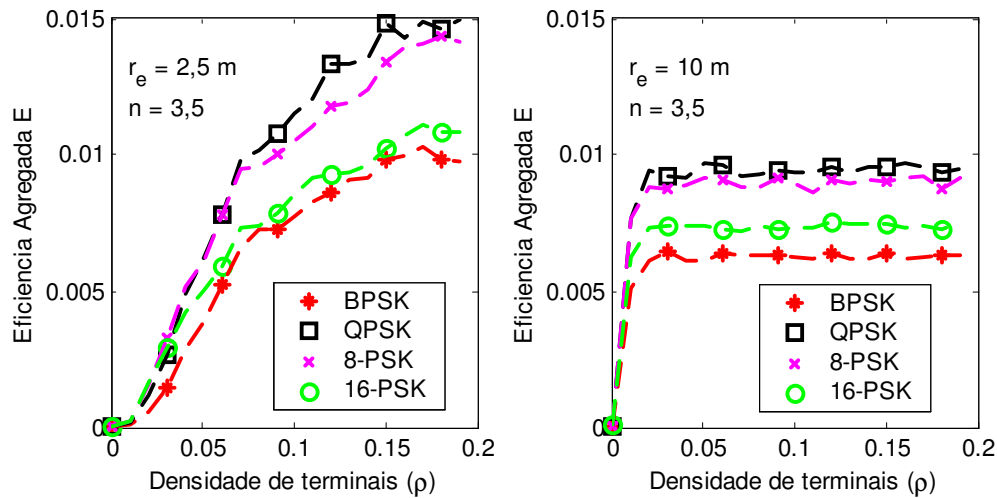
Com base nos resultados de densidade de enlaces ativos apresentados na seção anterior, pode-se agora determinar a eficiência de informação agregada para diferentes cenários.

Primeiramente, é analisada a influência do alcance de transmissão r_e na eficiência E , considerando diferentes esquemas de modulação, como mostrado na Figura 4.7. Pode-se notar que o valor máximo que a eficiência da rede pode alcançar (saturação) decresce com o aumento do raio de transmissão. Para um dado esquema de modulação, quando o raio de transmissão aumenta, há dois fatores que contribuem para a eficiência da rede. O alcance de transmissão r_e aumenta diretamente a eficiência, mas este aumento de r_e provoca a diminuição da densidade de enlaces ativos ρ_A . Os resultados da Figura 4.7 indicam que a redução de ρ_A tem maior impacto na eficiência quando o raio de transmissão aumenta.

Portanto, não é vantajoso transmitir a longas distâncias, pois o número de enlaces concorrentes será menor (ou seja, uma menor quantidade de pacotes trafegando na rede). Este resultado concorda com as conclusões obtidas no Capítulo 3.


 Figura 4.7: Eficiência agregada para QPSK e diferentes raios de transmissão r_e .

Em seguida, deseja-se analisar o efeito do esquema de modulação. As Figuras 4.8 (a) e (b) mostram a eficiência de informação agregada para diferentes esquemas de modulação, e alcances de $r_e = 2,5$ m e $r_e = 10$ m, respectivamente. O valor do expoente de perda de percurso para estes resultados é $n = 3,5$. Estes resultados mostram que, para este valor de expoente de perda de percurso, o esquema de modulação QPSK apresenta o melhor desempenho, enquanto que o esquema de modulação BPSK seria a pior escolha caso se desejasse maximizar a eficiência de informação agregada.


 Figura 4.8: Eficiência agregada para esquemas de modulação diferentes e $n = 3,5$: (a) raio de transmissão de 2,5m; (b) raio de transmissão de 10m.

O limiar γ para a relação sinal-interferência é dependente do esquema de modulação. Esquemas de modulação com muitos níveis requerem valores mais altos de γ para garantir a

qualidade do enlace, o que, por sua vez, reduz a densidade de enlaces ativos da rede. Por outro lado, tais esquemas são mais eficientes no uso do espectro, surgindo um compromisso entre a densidade ρ_A e a eficiência espectral da modulação. Os resultados da Figura 4.8 mostram que, para expoente de perda de percurso $n = 3,5$, o esquema de modulação QPSK encontra o melhor balanço entre esses efeitos opostos sobre a eficiência de informação agregada. Deve ser observado, todavia, que este balanço é afetado pelas características do ambiente de propagação, conforme discutido a seguir.

Por fim, é investigado como a atenuação do sinal devido às perdas de propagação e ao alcance de transmissão afetam a eficiência de informação agregada para esquemas de modulação diferentes. A figura 4.9 apresenta a eficiência de informação em função do alcance de transmissão para diferentes esquemas de modulação, expoente de perda de percurso $n = 2$ (baixa perda de percurso) e $n = 4,5$ (alta perda de percurso). A densidade de terminais da rede é, para este resultado, de $0,125$ terminais/m². Observa-se que uma forte atenuação do sinal transmitido aumenta a eficiência da rede. Entretanto, esquemas que usam um número maior de níveis de modulação beneficiam-se mais da atenuação da interferência causada por grandes perdas de percurso. Por exemplo, a eficiência da rede empregando a modulação 8-PSK alcança aquela da rede usando QPSK quando o expoente de perda de percurso aumenta de 2 para 4,5. Para $n > 4,5$, o esquema de modulação 8-PSK torna-se mais eficiente. Este resultado concorda, ao menos qualitativamente, com os resultados do Capítulo 3, em especial os mostrados na Figura 3.6. Ali, observa-se que a rede empregando 8-PSK é mais eficiente que aquela empregando QPSK para $n > 5,5$. A diferença entre estes valores de transição de expoente de perda de percurso pode ser atribuída às diferenças na modelagem da rede.

É interessante notar que a variação da eficiência da rede em função do alcance de transmissão depende da perda de percurso. Constata-se dos resultados que para canais com baixas perdas de propagação, a eficiência agregada de fato aumenta com o aumento do alcance de transmissão, enquanto que para grandes perdas de propagação há um valor ótimo de alcance de transmissão.

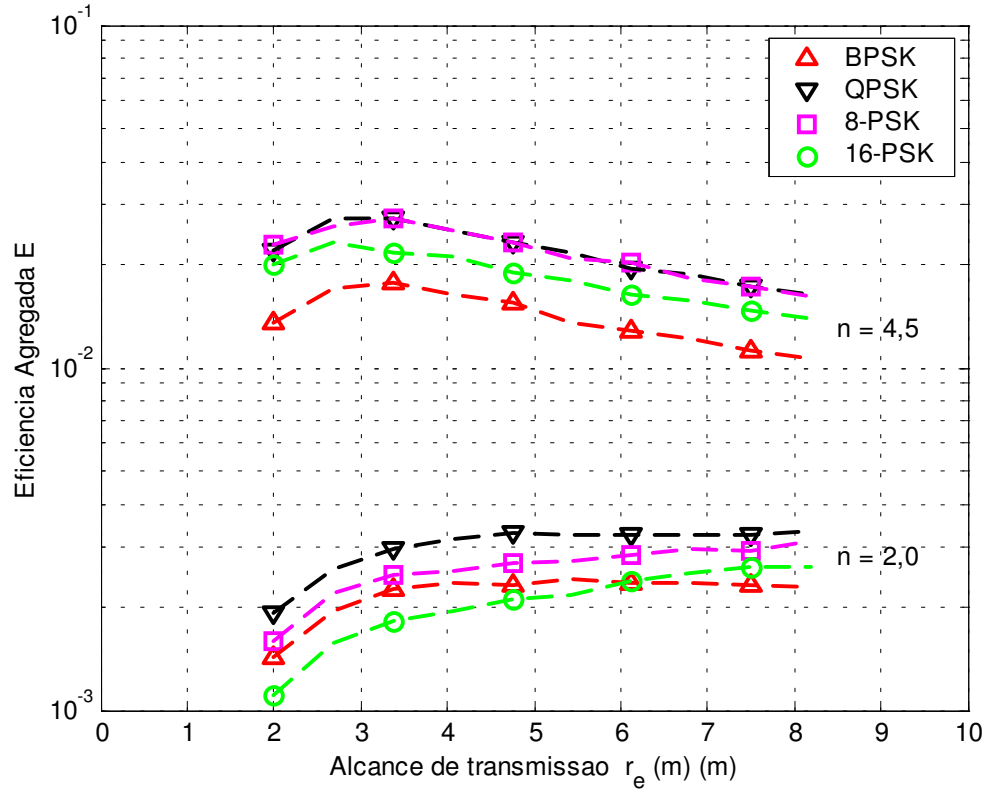


Figura 4.9: Eficiência agregada x raio de transmissão, para diferentes esquemas de modulação e diferentes valores de n . A densidade de terminais na rede é $\rho = 0,125$ terminais/m².

4.4 Conclusões

Neste capítulo foi apresentada uma nova modelagem da rede sem fio de múltiplos saltos para a avaliação do desempenho. O desempenho da rede foi medido por meio da sua eficiência de informação agregada. Foram analisados os efeitos de diversos parâmetros da rede na densidade de terminais ativos e na eficiência agregada.

Observou-se que a eficiência máxima da rede é obtida para valores reduzidos de alcance de transmissão, como também observado no Capítulo 3. Portanto, é mais vantajoso transmitir a curtas distâncias, pois permite um número maior de transmissões concorrentes.

Observou-se também que a melhor escolha de esquema de modulação para a maximização da eficiência da rede depende das perdas de propagação. Para valores de expoente de perda de percurso inferiores a 4,5, a melhor escolha é o QPSK, o que também está de acordo com os resultados do Capítulo 3.

Capítulo 5

Conclusões

5.1 Principais Resultados e Contribuições

O objetivo desta dissertação foi a análise do desempenho de redes de sensores sem fio. Em particular, atenção especial foi dada ao conceito de grau do terminal e a eficiência de informação agregada.

No Capítulo 2 foi discutido o conceito de grau do terminal, sendo apresentadas modelagens deste parâmetro para ambientes de propagação com e sem desvanecimento. Esta modelagem sugeriu que o grau do terminal em ambiente com e sem desvanecimento segue uma distribuição de Poisson, o que foi confirmado por meio de simulação. Observou-se também que o grau do terminal aumenta na presença de desvanecimento, e que este aumento depende da razão entre o desvio padrão do desvanecimento e o expoente de perda de percurso.

No Capítulo 3 foi introduzida uma extensão do conceito de eficiência de informação, denominada *eficiência de informação agregada*. Para a estimação desta medida de

desempenho, foi apresentada uma modelagem de uma rede *ad hoc* baseada na formação de regiões de silêncio em torno dos receptores. Por meio desta modelagem foi possível avaliar a influência de diversos parâmetros da rede na eficiência de informação agregada. Observou-se que a atenuação provocada pelo canal no sinal recebido tem grande influência na eficiência e na escolha do esquema de modulação que a maximiza. Os resultados mostram que se o canal de propagação provocar forte atenuação no sinal transmitido e, portanto, na interferência observada por um receptor, esquemas de modulação com mais níveis de modulação fornecem maior eficiência. Observou-se, também, que transmitir os pacotes utilizando pequenas distâncias de enlace é mais eficiente do que fazê-lo usando grandes distâncias.

Foi visto ainda que quando a probabilidade de sucesso de pacotes aumenta até 90%, ocorre um aumento da eficiência em se transmitir os pacotes, pois nestes casos o aumento desta probabilidade é mais relevante que a diminuição da densidade causada pelo maior limiar de *SIR* exigido. Entretanto, a partir de 90%, a diminuição da densidade torna-se preponderante e a eficiência decresce rapidamente com o aumento da probabilidade de acerto de pacote.

Por fim, no Capítulo 4 foi apresentada uma nova modelagem da rede sem fio de múltiplos saltos, baseada agora em simulação. Como no Capítulo 3, o desempenho da rede foi medido por meio da sua eficiência de informação agregada. Foram analisados os efeitos de diversos parâmetros da rede na densidade de terminais ativos e na eficiência agregada.

Observou-se que a eficiência máxima da rede é obtida para valores reduzidos de alcance de transmissão, como também observado no Capítulo 3. Portanto, é mais vantajoso transmitir a curtas distâncias, pois permite um número maior de transmissões concorrentes.

Observou-se também que a melhor escolha de esquema de modulação para a maximização da eficiência da rede depende das perdas de propagação. Para valores de expoente de perda de percurso inferiores a 4,5, a melhor escolha é o QPSK, o que também está de acordo com os resultados do Capítulo 3.

É interessante notar que a variação de alguns parâmetros pode provocar efeitos distintos nos tópicos estudados. Por exemplo, aumentar a densidade de terminais da rede é sempre benéfico do ponto de vista de conectividade, porém não se pode dizer o mesmo para a eficiência agregada, que pode ser beneficiada, levemente prejudicada ou nada sofrer, dependendo do valor da densidade.

Já o aumento do alcance do raio de transmissão provoca efeitos realmente opostos: melhora a conectividade, pois um maior número de terminais vizinhos passa a ser englobado pelo transmissor e, quase em todas situações, deteriora a eficiência, conforme visto no Capítulo 4.

A partir desta dissertação, dois artigos foram publicados, conforme mostrado adiante. O primeiro deles apresenta a abordagem utilizada no capítulo 3, e o segundo apresenta a abordagem mostrada no capítulo 4. Este fato aumenta a credibilidade e visibilidade deste trabalho.

Assim, as maiores contribuições desta tese foram as formas de se estimar o desempenho da rede e resultados decorrentes desta análise, que mostraram que muitos fatores influem na escolha da melhor configuração para a operação de uma rede de sensores sem fio.

5.2 Trabalhos Futuros

As seguintes questões foram identificadas para a continuação deste trabalho:

1. Inclusão de códigos corretores de erros nas modelagens da rede apresentadas nos Capítulos 3 e 4. Dado que tais técnicas afetam tanto a qualidade do enlace, quanto a eficiência espectral da comunicação, seria importante avaliar a sua influência na eficiência de informação agregada.
2. Inclusão na modelagem da rede do tráfego devido às retransmissões: os insucessos na transmissão de pacotes (como, por exemplo, perdas de pacotes ou pacotes com mais erros que o permitido) acarretam em muitos casos na retransmissão daqueles pacotes. Estas retransmissões devem ser levadas em conta na modelagem da rede, em particular no tráfego escoado na rede.
3. Desenvolver uma modelagem analítica equivalente àquela apresentada no Capítulo 4, de forma a ser ter analiticamente a comprovação dos resultados. Para tal, é necessário caracterizar a distribuição dos terminais da rede e a distribuição da interferência observada por um dado terminal.
4. Emprego de antenas diretivas para redução de interferência co-canal. O uso de tais antenas em redes *ad hoc* tem merecido atenção nos últimos anos, graças a

habilidade de reduzir a interferência e aumentar a eficiência do reuso espacial do canal.

5. Incluir na análise do desempenho um balanço de energia gasta pelos terminais.

5.3 Publicações

- A. G. Mignaco, P. Cardieri, “Estimação de Capacidade de Transporte de Redes Ad Hoc.” *XXII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*, Campinas – SP, 2005.
- A. G. Mignaco, P. Cardieri, “Total information efficiency of multihop wireless networks,” *25th IEEE International Performance Computing and Communications Conference*, Abril de 2006.

Referências

- [1] I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci. “Wireless sensor networks: a survey”, *Computer Networks*, Vol. 38, no 4, pp. 393-422, March 2002.
- [2] A. Cerpa, J. Élson, D. Estrin, L. Girod, M. Hamilton, J. Zhao, “Habitat Monitoring: Application Driver for Wireless Communications Technology”, 2001 ACM SIGCOMM Workshop on Data Communications in Latin America and the Caribbean, Costa Rica, April 2001.
- [3] P. Bauer, M. Sichitiu, R. Istepanian, K. Premaratne, “The Mobile Patient: wireless distributed sensor networks for patient monitoring and care”, *Proceedings 2000 IEEE EMBS International Conference on Information Technology Applications in Biomedicine*, 2000, pp. 17-21.
- [4] J.M. Kahn, R.H. Katz, K.S.J. Pister, “Next century challenges: mobile networking for smart dust”, *Proceedings of the ACM MobiCom’99*, pp. 271-278, Washington, USA, August 1999.
- [5] A. Chandrakasan, R. Amirtharajah, S. Cho, J. Goodman, G. Konduri, J. Kulik, W. Rabiner, A. Wang, “Design Considerations for Distributed Microsensor Systems”, *IEEE Custom Integrated Circuits Conference (Invited Talk)*, pp. 279-286, San Diego, California, May 1999.
- [6] J.M. Rabaey, M.J. Ammer, J.L. da Silva Jr., D. Patel, S. Roundy, “PicoRadio supports ad hoc ultra-low power wireless networking”, *IEEE Computer Magazine* (2000) 42–48.
- [7] A. Porret, T. Melly, C.C. Enz, E.A. Vittoz, “A low-power low-voltage transceiver architecture suitable for wireless distributed sensors network”, *IEEE International Symposium on Circuits and Systems’00*, Geneva, Vol. 1, 2000, pp. 56–59.
- [8] A. Perrig, R. Szewczyk, V. Wen, D. Culler, J.D. Tygar, “SPINS: security protocols for sensor networks”, *proceedings of ACM MobiCom’01*, Rome, Italy, 2001, pp. 189–199.
- [9] I. Chlamtac, M. Conti, J.J.-N Liu, “Mobile ad hoc networking: imperatives and challenges”, *Ad Hoc Networks*, vol. 1, no. 1, pp. 13-64, July 2003.
- [10] T. Imielinski, S. Goel, DataSpace: “Querying and Monitoring Deeply Networked Collections in Physical space”, *IEEE Personal Communications*, October 2000.
- [11] R. Hekmat, P.V. Mieghem, “Study of Connectivity in Wireless Ad – Hoc Networks”, *WiOpt’04*, Cambridge, UK, 24th - 26th of March, 2004.
- [12] M. D. Yacoub, “Foundations of Mobile Radio Engineering”, CRC Press, 1993.
- [13] C. Bettstetter, “On the connectivity of wireless multihop networks with homogeneous and inhomogeneous range assignment”. In *Proc. IEEE Vehicular Technology Conf. (VTC)*, (Vancouver, BC, Canada), Sept. 2002.

- [14] R. Hekmat and P. Van Mieghem, “Degree distribution and hopcount in wireless ad-hoc networks”, Proceeding of the 11th IEEE International Conference on Networks (ICON 2003), Sydney, Australia, pp.603-609, Sept. 28 – Oct. 1, 2003.
- [15] J. Zhu, S. Papavassiliou, “On the connectivity modeling and the tradeoffs between reliability and energy efficiency in large scale wireless sensor networks”. WCNC 2003 - IEEE Wireless Communications and Networking Conference, vol. 4, no. 1, March 2003, pp. 1260-1265.
- [16] O. Dousse, F. Baccelli, P. Thiran, “Impact of Interferences on Connectivity in ad hoc networks”, Proc. IEEE Infocom, San Francisco, April 2003.
- [17] J. Orris, S.K. Barton, “Probability distributions for the number of radio receivers which can communicate with one another”, IEEE Transactions on Communications, vol. 51, no 4, April 2003.
- [18] IEEE Std 802.15.1 - 2005 IEEE Standard for Information technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks - Specific requirements. - Part 15.1: Wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for wireless personal area networks (WPANs).
- [19] P. Gupta and P.R. Kumar, “The capacity of wireless networks”, IEEE Transactions on information theory, 46(2): 388-404, March 2000.
- [20] L. Kleinrock, J. Silvester, “Optimum transmission radii for packet radio networks or why six is a magic number”, Proc. IEEE NTC, pp.4.3.1-5, December 1978.
- [21] E. S. Sousa, J. A. Silvester, “Optimum transmission range in ad direct-sequence spread-spectrum multihop packet radio network,” IEEE Journal on Selected Area in Communications, vol. 8, pp. 762 – 771, June 1990.
- [22] H. Takagi and L. Kleinrock, “Optimal transmission range for randomly distributed packet radio terminals,” IEEE Trans. Communications. Vol. 32, pp. 264-257, March 1985.
- [23] M. W. Subbarao, B. L. Hughes, “Optimal Transmission Ranges and codes rates for frequency-hop packet radio networks,” IEEE Trans. Communications, vol. 48, pp. 670-678, April 2000.
- [24] S. Olafsson, Complexity Research Group, Btexact, “Modelling Capacity and Local Connectivity”, Ad Hoc Networks Complexity Research Group.
- [25] H.R. Thompson, “Distribution of distance to nth neighbor in a population of randomly distributed individuals”, Ecology, vol. 37, no. 2, 1956.
- [26] S. Haykin, “Communication systems”, 4rd ed. Wiley 2001.