

Universidade Estadual de Campinas  
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

## **Avaliação de Desempenho de Redes Sem Fio Ad Hoc**

**Autor: Renata Rampim de Freitas Dias**

**Orientador: Prof. Dr. Paulo Cardieri**

**Dissertação de Mestrado** apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

### Banca Examinadora

Andréa Lucia Braga Vieira Rodrigues, Profa. Dra. .... Eng. da Computação/Uniso  
Michel Daoud Yacoub, Prof. Dr. .... DECOM/FEEC/Unicamp  
Paulo Cardieri, Prof. Dr. .... DECOM/FEEC/Unicamp  
Renato da Rocha Lopes, Prof. Dr. .... DECOM/FEEC/Unicamp

Campinas, SP

Novembro/2007

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

D543a            Dias, Renata Rampim de Freitas  
                    Avaliação de desempenho em redes sem fio Ad Hoc./  
                    Renata Rampim de Freitas Dias. –Campinas, SP: [s.n.],  
                    2007.

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

                    1.Sistemas de comunicações sem fio. 2. Interconexão de  
                    redes (Telecomunicações). 3.Telecomunicações - Tráfego.  
                    4.Arquitetura de rede de computador. I. Cardieri, Paulo. II.  
                    Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de  
                    Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título

Título em Inglês: Performance analysis of wireless Ad Hoc networks.

Palavras-chave em Inglês: Wireless networks, Ad-Hoc, TDMA, Performance analysis  
of wireless networks

Área de concentração: Telecomunicações e Telemática

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: Andréa Lucia Braga Vieira Rodrigues, Michel Daoud Yacoub,  
Renato da Rocha Lopes

Data da defesa: 27/11/2007

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Elétrica

## COMISSÃO JULGADORA - TESE DE MESTRADO

**Candidata:** Renata Rampim de Freitas Dias

**Data da Defesa:** 27 de novembro de 2007

**Título da Tese:** "Avaliação de Desempenho de Redes Sem Fio Ad Hoc"

Prof. Dr. Paulo Cardieri (Presidente): Paulo Cardieri

Profa. Dra. Andréa Lucia Braga Vieira Rodrigues: ALBR

Prof. Dr. Renato da Rocha Lopes: Renato Lopes

Prof. Dr. Michel Daoud Yacoub: Michel Daoud Yacoub

# Resumo

As características intrínsecas de uma rede ad hoc sem fio de múltiplos saltos, tais como a ausência de uma entidade controladora central e de infra-estrutura, a possibilidade de comunicação direta entre as estações, além da degradação imposta pelo canal sem fio, impõem desafios à análise do desempenho de tais redes. Tais desafios são ainda maiores quando se deseja empregar uma formulação analítica. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um modelo analítico para o desempenho de uma rede ad hoc sem fio, estendendo os modelos encontrados na literatura, com a inclusão de parâmetros da camada física. Com base neste modelo, é apresentada a análise de uma rede, avaliando como o atraso e a vazão são afetados por diversos parâmetros da rede. A análise mostra que dependendo do controle da interferência e da robustez do sistema de transmissão, a capacidade da rede pode ser limitada pela interferência ou pelo atraso. Foi mostrada também a possibilidade da rede operar com um sistema de modulação adaptativo, através do qual a robustez da modulação é alterada para controlar a perda de pacotes e garantir a máxima vazão de dados, mas às custas do aumento no atraso.

**Palavras-chave:** rede sem fio, ad hoc, TDMA, análise de desempenho de redes sem fio.

# Abstract

The intrinsic characteristics of wireless multi-hop ad-hoc networks, such as the absence of a centralized control entity and infrastructure, the possibility of direct communication between stations and the degradation resultant from the wireless channel, impose challenges to the performance analysis of such networks. These challenges are even greater when analysis is done through analytical formulations. This work presents the development of an analytical model for the performance of wireless ad-hoc networks, which extends models found in the literature by including parameters of the physical channel. Having this model as a basis, a practical network analysis is presented, measuring how delay and throughput are affected by various network parameters. The analysis shows that, depending on the interference control and the robustness of the transmission system, the network capacity can be limited by interference or by delay. The possibility of the network operating with an adaptive modulation system is also shown. In this case, the robustness of the modulation is changed to control the packet loss and guarantee the maximum throughput, having as a cost an increase in delay.

**Keywords:** wireless networks, ad-hoc, TDMA, performance analysis of wireless networks.

*Ao meu marido: Ricardo*  
*Aos meus filhos: Gabriela e Guilherme*

# Agradecimentos

Ao meu orientador Prof. Dr. Paulo Cardieri, pela orientação e principalmente por sua paciência, dedicação e conhecimento.

Ao Prof. Dr. Michel Daoud Yacoub pela amizade e colaboração.

Aos amigos de laboratório, pelo apoio e companheirismo. Em especial, agradeço ao Ugo, Cândido, Daniel, Pedro, Rafael, Álvaro e Flávio, pela ajuda em todos os momentos que eu solicitei.

À Faculdade de Engenharia de Sorocaba, pela sua iniciativa com o plano de capacitação para docentes que me ajudou financeiramente.

Aos meus pais, Júlio e Graça, por sempre acreditar em minha capacidade e perseverança.

Aos meus sogros, Márcio e Célia, pela ajuda e fundamental apoio com os meus filhos durante esta jornada.

Aos meus familiares e amigos pelo carinho e em especial ao tio Wilson Sandano pelo incentivo à prosseguir na carreira acadêmica.

À Dona Cleide, nossa querida Dô, pela sua ajuda ininterrupta e dedicação.

Ao meu marido, Ricardo, pelo seu amor, paciência, dedicação, apoio e sabedoria, me encorajando em todos os momentos mesmo naqueles mais difíceis.

Aos meus filhos, Gabriela e Guilherme, pela compreensão nos momentos em que eu estava ausente.

Finalmente, à Deus por me dar tamanha força e ânimo, fazendo com que eu perseverasse e à Nossa Senhora que jamais me desamparou nas minhas viagens, sempre intercedendo por mim e por minha família.

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>ix</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xi</b>
<b>Glossário</b>	<b>xii</b>
<b>Lista de Símbolos</b>	<b>xii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
<b>2 Modelagem da rede ad hoc sem fio</b>	<b>7</b>
2.1 Modelo do canal de propagação . . . . .	7
2.2 Topologia de rede . . . . .	8
2.2.1 Estrutura toroidal . . . . .	8
2.2.2 Técnica de Acesso . . . . .	10
2.3 Modelagem do Tráfego . . . . .	13
2.4 Modelagem da camada física . . . . .	16
2.4.1 Sistema de transmissão . . . . .	16
2.4.2 Relação sinal-interferência . . . . .	16
2.5 Vazão Efetiva . . . . .	20
2.6 Modelagem do Atraso . . . . .	21
2.6.1 Atraso médio em um enlace transmissor-receptor . . . . .	21
2.6.2 Atraso médio em um enlace fonte-destino . . . . .	22
2.7 Visão geral da modelagem da rede e sumário dos parâmetros . . . . .	24
2.8 Validação do modelo para o cálculo do atraso . . . . .	26
<b>3 Análise do Desempenho</b>	<b>29</b>
3.1 Avaliação do atraso . . . . .	29
3.2 Avaliação da vazão . . . . .	33
3.3 Formas de limitação do desempenho da rede . . . . .	35
3.4 Máxima taxa de geração de pacotes agregada . . . . .	40
3.5 Atraso versus vazão efetiva . . . . .	42
3.6 Conclusões . . . . .	47

## SUMÁRIO

---

viii

<b>4 Conclusões</b>	<b>50</b>
4.1 Trabalhos futuros . . . . .	51
<b>Referências bibliográficas</b>	<b>53</b>



# Lista de Figuras

1.1	Rede ad hoc sem fio: rota da estação fonte A para a estação destino F, utilizando a estação C como intermediária. . . . .	2
1.2	Exemplo de rede ad hoc com estações dispostas em uma grade triangular. . . . .	5
2.1	Rede ad hoc com as estações dispostas segundo uma grade triangular. . . . .	8
2.2	Estrutura toroidal para uma rede. . . . .	9
2.3	Rede com $N = 9$ estações com estrutura toroidal. . . . .	10
2.4	Estrutura do quadro TDMA. . . . .	10
2.5	Rede ad hoc com 81 estações, com distância de reuso $d_r = 3$ . Círculos escuros representam estações transmissoras em um dado <i>time-slot</i> . . . . .	11
2.6	Representação de uma rede ad hoc com $N = 81$ após a formação da estrutura toroidal, com distância $d_r = 3$ . . . . .	12
2.7	Rede ad hoc com $N = 9$ estações, onde estão representados os dois enlaces possíveis partindo da estação (0, 0) (fonte) até a estação (1, 1) (destino). . . . .	14
2.8	$\overline{SIR}$ em função de $p_{at}$ , para $d_r = 2$ e $\alpha=3$ : curva ajustada e valores de simulação. . .	19
2.9	$\overline{SIR}$ em função da probabilidade $p_{at}$ , da distância $d_r$ e $\alpha$ . . . . .	20
2.10	Rede ad hoc com 25 estações com a estação Fonte (0, 0) e a distância $d_{tx} = a$ . . . . .	23
2.11	Resultados de validação da modelagem do atraso na rede: $N = 225$ , $T_{ts} = 0,1$ s e $d_r = 3$ . . . . .	27
2.12	Resultados de validação da modelagem do atraso na rede: $N = 225$ , $T_{ts} = 0,1$ s e $d_r = 5$ . . . . .	27
3.1	Atraso médio $\bar{\tau}_{tr}$ para distância $d_r = 3$ , expoente de perda de percurso $\alpha = 3$ e diferentes ordens de modulação. . . . .	31
3.2	Atraso médio $\bar{\tau}_{tr}$ para distância $d_r = 5$ , expoente de perda de percurso $\alpha = 3$ e diferentes ordens de modulação. . . . .	32
3.3	Vazão efetiva em um enlace transmissor-receptor para $d_r = 3$ , $\alpha = 3$ e diferentes ordens de modulação. Os asteriscos (*) indicam o valor $\lambda_m$ que provoca $P_{pct} = 1\%$ . .	33
3.4	Vazão efetiva em um enlace transmissor-receptor para $d_r = 5$ , $\alpha = 3$ e diferentes ordens de modulação. . . . .	34
3.5	Vazão efetiva em um enlace transmissor-receptor para $d_r = 3$ , $\alpha = 5$ e diferentes ordens de modulação. . . . .	35

3.6	Máximas taxas de geração de pacotes por estação limitadas pela interferência ( $\lambda_m^{int}$ ) e limitadas pelo atraso ( $\lambda_m^{at}$ ) em função da ordem da modulação, para diferentes valores de $d_r$ e expoente de perda de percurso $\alpha = 3$ . . . . .	36
3.7	Máximas taxas de geração de pacotes por estação limitadas pela interferência ( $\lambda_m^{int}$ ) e limitadas pelo atraso ( $\lambda_m^{at}$ ) em função da ordem da modulação, para diferentes valores de $d_r$ e expoente de perda de percurso $\alpha = 4$ . . . . .	37
3.8	Máximas taxas de geração de pacotes por estação limitadas pela interferência ( $\lambda_m^{int}$ ) e limitadas pelo atraso ( $\lambda_m^{at}$ ) em função da ordem da modulação, para diferentes valores de $d_r$ e expoente de perda de percurso $\alpha = 5$ . . . . .	37
3.9	Máximas taxas de geração de pacotes por estação limitadas pela interferência ( $\lambda_m^{int}$ ) e limitadas pelo atraso ( $\lambda_m^{at}$ ) em função da ordem da modulação, para diferentes valores de $d_r$ e expoente de perda de percurso $\alpha = 6$ . . . . .	38
3.10	Máximas taxas $\lambda_m$ em função da modulação, para $P_{pct,max} = 1\%$ e diferentes expoentes $\alpha$ : (a) $d_r = 3$ , (b) $d_r = 5$ e (c) $d_r = 7$ . . . . .	39
3.11	Máxima taxa de chegada de pacote agregada $\lambda_{m,A}$ em função da ordem da modulação para diferentes distância $d_r$ com $P_{pct} \leq 1\%$ : (a) $\alpha = 3$ , (b) $\alpha = 4$ , (c) $\alpha = 5$ e (d) $\alpha = 6$ . . . . .	41
3.12	Atraso $\bar{\tau}_{tr}$ versus vazão efetiva para $d_r = 3$ , $\alpha = 3$ e diferentes modulações. Números próximos aos asteriscos indicam o valor correspondente da taxa de geração de pacotes $\lambda_m$ . . . . .	43
3.13	Atraso $\bar{\tau}_{tr}$ versus vazão efetiva para diferentes modulações, para $d_r = 3$ e $\alpha = 3$ . . .	44
3.14	Atraso $\bar{\tau}_{tr}$ versus vazão efetiva para diferentes modulações, para $d_r = 7$ e $\alpha = 6$ . . .	45
3.15	Envelope das curvas atraso $\bar{\tau}_{tr}$ vs. vazão efetiva por estação, para $d_r = 3$ e $\alpha = 3$ . As linhas tracejadas representam as curvas para as diferentes modulações. . . . .	46
3.16	Envelope para $\alpha = 3$ e diferentes distâncias $d_r$ . Curvas individuais para $d_r = 7$ , com $M = 2$ e 4 são também mostradas. . . . .	46
3.17	Vazão efetiva $\eta_{est}$ e atraso $\bar{\tau}_{tr}$ em função da taxa de chegada de pacotes $\lambda_m$ para $d_r = 7$ e $\alpha = 3$ . Os números próximos às curvas indicam a ordem da modulação correspondente. . . . .	47
3.18	Envelope para $\alpha = 4$ e diferentes distâncias $d_r$ . . . . .	48
3.19	Envelope para $\alpha = 5$ e diferentes distâncias $d_r$ . . . . .	48
3.20	Envelope para $\alpha = 6$ e diferentes distâncias $d_r$ . . . . .	49

# Lista de Tabelas

2.1	Número de estações ativas $N_{at}$ para alguns valores de número de estações na rede $N$ e diferentes distâncias $d_r$ . . . . .	12
2.2	Fator de utilização das estações da rede mostrada na Figura 2.7 para enlaces F-D partindo da estação $(0, 0)$ . . . . .	15
2.3	Parâmetros da rede mantidos fixos. . . . .	26
3.1	Parâmetros da rede mantidos fixos. . . . .	30
3.2	Número de estações transmissoras concomitantes $N_{at}$ na rede para $N = 11025$ para os valores de $d_r$ considerados neste estudo. . . . .	30
3.3	Ordens de modulação que resultam na maior taxa de chegada de pacotes agregada para $P_{pct} \leq 1\%$ . . . . .	42

## Lista de Símbolos

$a$	- Distância entre as estações vizinhas
$B$	- Banda disponível
$d_i$	- Distância entre o receptor teste e o $i$ -ésimo transmissor interferente
$d_r$	- Distância de reuso normalizada em $a$
$D_r$	- Distância de reuso
$d_{tx}$	- Distância entre transmissor-receptor
$K$	- Número de camadas de estações
$L$	- Número de linhas (e colunas)
$L_k$	- Combinação possíveis de $k$ transmissores ativos
$L_m$	- Número de bits por pacote
$M$	- Ordem da modulação M-QAM
$n_t(x, y)$	- Possibilidades de enlaces F-D de menor caminho em saltos
$n_p^{x,y}(i, j)$	- Número que uma estação intermediária é utilizada no enlace F-D
$\bar{n}_h$	- Número médio de saltos entre Fonte e Destino
$\bar{n}_r$	- Número médio de enlaces que passam por uma estação da rede
$N$	- Número de estações
$N_{at}$	- Número de estações ativas
$p_{at}$	- Probabilidade de ativação da estação
$P_b$	- Probabilidade de erro de bit
$P_i$	- Potência total interferente
$P_{pct}$	- Probabilidade de erro de pacote
$P_{pct,max}$	- Máxima probabilidade de erro de pacote aceitável
$P_r$	- Potência média na estação receptora
$P_t$	- Potência média na estação transmissora
$\mathbb{P}\{j = k\}$	- Probabilidade de $k$ estações estarem ativas
$R_b$	- Taxa de transmissão de bits
$SIR$	- Relação sinal-interferência
$T_q$	- Tempo de duração de um quadro TDMA
$T_e$	- Tempo médio de espera no quadro
$T_s$	- Tempo de transmissão de um <i>time-slot</i>
$T_{tx}$	- Tempo de transmissão do pacote
$\bar{u}^{x,y}(i, j)$	- Utilização média de cada estação intermediária do enlace F-D
$W_q$	- Tempo médio de espera na fila
$\alpha$	- Coeficiente de perda de percurso
$\eta$	- Vazão efetiva
$\eta_{est}$	- Vazão efetiva por estação

---

$\kappa_i$	- Variável aleatória binomial de atividade da i-ésima estação interferente
$\lambda_{est}$	- Taxa de pacotes que uma estação efetivamente transmite
$\lambda_m$	- Taxa de geração de pacotes por estação
$\lambda_{m,A}$	- Máxima taxa de geração de pacote agregada
$\lambda_m^{at}$	- Máximo valor da taxa de geração de pacotes que leva o atraso médio para infinito
$\lambda_m^{int}$	- Máximo valor da taxa de geração de pacotes devido à interferência
$\rho$	- Intensidade de tráfego de uma estação
$\bar{\tau}_{fd}$	- Atraso total da Fonte até Destino
$\bar{\tau}_{tr}$	- Atraso médio da estação transmissora até a estação receptora
$\xi$	- Parâmetros das antenas transmissoras e receptoras
$\frac{1}{\mu}$	- Tempo médio de serviço do TDMA

# Capítulo 1

## Introdução

Uma rede ad hoc sem fio é uma rede na qual as estações se comunicam diretamente umas com as outras (*peer-to-peer*), e que se estabelece sem a necessidade de infra-estrutura ou administração centralizada. As estações estão conectadas a equipamentos que geram informação (pacotes de bits) que deve ser transmitida a outras estações. A comunicação entre uma estação, onde foi gerado o pacote, até a estação destino daquele pacote é realizada por meio da técnica *armazena-encaminha*. Uma estação que deseja enviar uma mensagem acessa o meio e transmite a sua informação a uma estação vizinha. Caso a informação não seja destinada àquela estação vizinha, esta armazena a informação recebida até encontrar um momento apropriado para encaminhá-la à outra estação, no caminho em direção ao destino da informação, formando um enlace com múltiplos saltos entre a fonte e o destino.

Os serviços de rede, como por exemplo, roteamento e controle de acesso ao meio, são realizados em uma rede ad hoc de forma distribuída por todas as estações da rede. A Figura 1.1 ilustra uma rede ad hoc sem fio, em que a estação A (fonte) transmite para a estação F (destino), utilizando a estação C como intermediária, estabelecendo assim uma rota. Os possíveis enlaces entre as estações são mostrados pela linha cheia. Note-se que, a partir da operação da rede, surgem dois tipos de enlace: o *enlace transmissor-receptor*, ou enlace de um salto, em que uma estação se comunica diretamente com outra estação, e o *enlace fonte-destino*, em que uma estação utiliza múltiplos saltos para se comunicar com uma outra estação que esteja fora do seu alcance.

O conceito de redes ad hoc com múltiplos saltos para comunicação apareceram muito antes do advento das redes de comunicação eletrônica. Por volta de 500 a.C., Darius I (522-486 a.C.), rei da Pérsia, planejou um sistema de comunicação inovador, que consistia em mandar mensagens e notícias de sua cidade para províncias remotas de seu império por meio de uma linha de homens gritando em estruturas elevadas. Este sistema era muito mais rápido se comparado com os mensageiros tradicionais daquela época. A utilização de comunicação ad hoc também foi empregada em muitas sociedades tribais antigas, transmitindo sons por meio de uma cadeia de trombetas repetidoras [1].

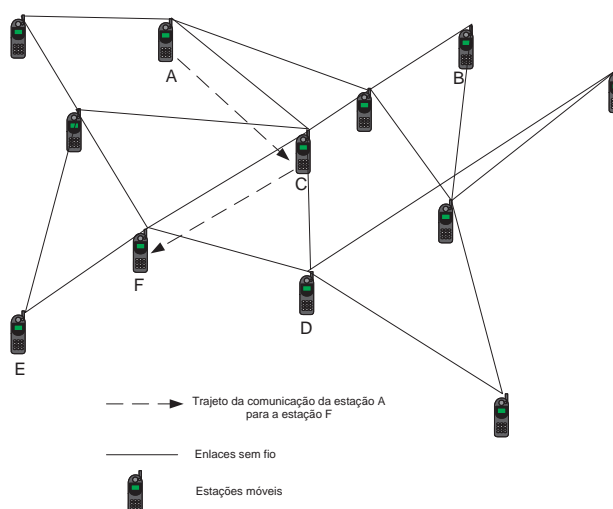


Fig. 1.1: Rede ad hoc sem fio: rota da estação fonte A para a estação destino F, utilizando a estação C como intermediária.

As primeiras aplicações do conceito de redes ad hoc em redes sem fio apareceram na década de 70, com projetos da DARPA (*Defense Advanced Research Projects Agency*) dos Estados Unidos. Um destes projetos pioneiros se baseava numa arquitetura distribuída e consistia em uma rede de rádios com um controle centralizado mínimo. A rede utilizava uma combinação de CSMA e ALOHA como mecanismos de acesso ao meio para suportar o compartilhamento dinâmico do canal de rádio.

Diversos outros projetos apareceram na seqüência, visando investigar e aperfeiçoar técnicas e protocolos de comunicação que sejam apropriados às redes ad hoc sem fio. Essencialmente, a motivação central dos projetos passados e atuais na área de redes ad hoc sem fio é resolver as dificuldades encontradas na comunicação devido às características intrínsecas de redes ad hoc sem fio, quais sejam:

1. A possibilidade de comunicação entre quaisquer estações da rede, diretamente ou por meio de múltiplos saltos, usando as estações vizinhas;
2. O caráter *broadcasting* da comunicação sem fio;
3. A ausência de um entidade controladora central, que tenha conhecimento sobre toda ou parte da rede, com o objetivo de gerenciar o funcionamento da rede.

Estas características das redes ad hoc sem fio não apenas impõem desafios à operação adequada das técnicas e mecanismos de controle da rede, mas também tornam a tarefa de estimar a capacidade e avaliar o desempenho de tais redes bastante difícil. No âmbito da avaliação de desempenho, uma

revisão bibliográfica mostra que estas características mencionadas anteriormente, que motivaram o desenvolvimento de diversos modelos analíticos, que tentam capturar as particularidades das redes ad hoc, como discutido a seguir.

### Revisão bibliográfica sobre modelagem de redes ad hoc

Takagi e Kleinrock propuseram em [2] um dos primeiros modelos para avaliar o desempenho de uma rede ad hoc. Este modelo baseia-se na relação entre a probabilidade de sucesso  $P_S$  na transmissão de um pacote e o comprimento médio  $d_{TR}$  do enlace transmissor-receptor (um salto). A diminuição da distância  $d_{TR}$  tende a provocar o aumento da probabilidade  $P_S$ , já que a qualidade do enlace aumenta. Por outro lado, a diminuição de  $d_{TR}$  leva ao aumento do número de saltos entre as estações fonte e destino. Dessa forma, aumenta-se o tráfego total na rede e, conseqüentemente, o seu nível de congestionamento, o que provoca a diminuição da probabilidade de sucesso na transmissão de um pacote. A partir desse compromisso, Takagi e Kleinrock propuseram uma medida de capacidade denominada *expected forward progress*, definida como o produto da vazão em um enlace de um salto e a distância média  $d_{TR}$ . Subbarao e Hughes [3] aperfeiçoaram o modelo de Takagi e Kleinrock, incluindo os efeitos do sistema de transmissão, e propuseram o conceito de *eficiência de informação*, definido como o produto do *expected forward progress* e da eficiência espectral do sistema de transmissão. Assim, a eficiência da informação mede a eficiência com que os bits de informação são transmitidos através da rede.

Um outro trabalho importante na área de modelagem de redes ad hoc foi aquele de Gupta e Kumar publicado em 2000 [4], no qual os autores propõem o conceito de *capacidade de transporte* e analisam os limites da capacidade de um rede ad hoc. Neste trabalho os autores consideram uma rede ad hoc em que cada estação pode se comunicar com qualquer outra estação, diretamente ou por meio de múltiplos saltos. Com base no modelo proposto, os autores mostram que a vazão de uma estação tende a zero quando o número de estações na rede tende ao infinito.

Tipicamente, as redes ad hoc empregam técnica de acesso aleatório, devido à ausência de uma entidade controladora central. No entanto, técnicas de acesso sem contenção, como TDMA, podem ser utilizadas em redes ad hoc, o que exige o uso de algum mecanismo de sincronismo temporal distribuído. No entanto, a exigência do uso de técnicas de sincronismo adequadas não é mais uma restrição ao uso da técnica TDMA em redes ad hoc, devido ao surgimento de diversas técnicas de sincronismo apropriadas para tais redes.

Nelson e Kleinrock realizaram um dos primeiros estudos sobre o uso da técnica TDMA em redes ad hoc de múltiplos saltos [5]. Na rede investigada, cada *time-slot* é alocado a um grupo de estações que não provocam interferências entre si e estão distribuídas espacialmente, o que originou o nome TDMA espacial (*Spatial TDMA*). Cada estação na rede é modelada como um sistema fila/servidor,



que é alimentado por pacotes que chegam de outras estações (tráfego externo) e pacotes que são gerados localmente (tráfego interno). Neste estudo, Nelson e Kleinrock empregaram a aproximação de fluido, na qual um processo estocástico é substituído pelo seu valor médio. A partir desta aproximação para o número de pacotes na fila de uma estação, os autores calculam o atraso médio dos pacotes nas estações.

Gronkvist [6] também estudou a técnica TDMA espacial em redes ad hoc, dando atenção especial ao problema da alocação dos *time-slots*. Em particular, são investigadas duas formas de alocação de *time-slots*: a alocação por enlace (*Link Assignment*) e a alocação por estação (*Node Assignment*). Também neste estudo, as estações foram modeladas como fila/servidor, com tráfego externo e interno. A vazão e o atraso médios da rede foram analisados, mas empregando simulação.

Outro estudo importante sobre o uso de TDMA em redes ad hoc, em especial para o presente trabalho, é aquele de Shrader et al. [7]. Os autores investigam o atraso de pacotes em uma rede com topologia regular, ou seja, com as posições das estações seguindo uma grade de formato regular. Um modelo analítico para o atraso foi desenvolvido, com cada estação modelada como um sistema servidor/fila, com tráfego de entrada externo e interno. Usando o *Princípio da Independência*, proposto por Kleinrock [8], é suposto que o processo de chegada de pacotes em um dado enlace é independente dos atrasos e dos processos de chegada dos enlaces vizinhos. Assim, o processo de chegada de pacotes de cada estação é considerado Poissoniano e as estações são modeladas como um sistema de filas do tipo M/D/1.

Por fim, Ferrari, Tonguz e outros [9] desenvolveram modelos analíticos para avaliação do desempenho de redes ad hoc, com os quais esquemas de acesso com e sem reserva foram investigados. No esquema com reserva (*Reservation-Based Switching*, RB), uma estação fonte reserva as estações intermediárias que pertencem ao enlace fonte-destino até a estação destino desejada para a transmissão de um pacote. Por outro lado, no esquema sem reserva (*Non-Reservation-Based Switching*, NRB), nenhuma reserva de estação é feita para a transmissão dos pacotes e os pacotes são transmitidos assim que a estação fonte encontra uma rota. Os resultados mostram que o esquema NRB suporta um tráfego maior que o esquema RB, especialmente quando o número máximo de estações transmissoras ativas simultâneas é pequeno. Porém, o esquema RB resulta em atrasos menores do que aqueles observados no esquema NRB.

### **Objetivo deste trabalho e contribuições**

Este trabalho objetiva investigar o desempenho de redes ad hoc sem fio de múltiplos saltos. Para esta investigação, foi desenvolvido um modelo de operação da rede ad hoc, supondo o uso da técnica TDMA espacial. As estações da rede são distribuídas segundo uma grade regular de formato triangular, como ilustrado na Figura 1.2. A modelagem desenvolvida usa o Princípio da Independência de

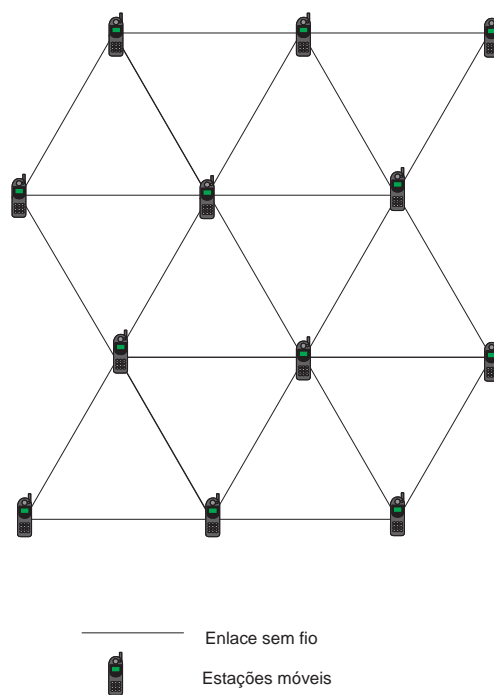


Fig. 1.2: Exemplo de rede ad hoc com estações dispostas em uma grade triangular.

Kleinrock, como no trabalho de Shrader [7], o que permitiu a derivação de uma expressão fechada para o atraso. Além disso, o modelo da rede inclui características da camada física, em particular do esquema de modulação e a probabilidade de erro de pacotes. Utilizando este modelo, o desempenho da rede é analisado por meio da avaliação do atraso e da vazão de pacotes, em função do esquema de modulação, atenuação do sinal no meio de propagação e do grau de reuso do canal (*time-slots*) devido a técnica TDMA espacial.

As contribuições desta dissertação são resumidas da seguinte forma:

- Extensão dos modelos analíticos de rede ad hoc de múltiplos saltos encontrados na literatura, com a inclusão de características do sistema de transmissão e de um modelo de comportamento das estações interferentes mais realistas;
- Análise do desempenho de uma rede ad hoc, com a caracterização das formas de limitação da capacidade da rede. Além disso, o modelo desenvolvido permite a avaliação da influência da interferência (por meio da probabilidade de erro de pacotes) no compromisso entre vazão e atraso.

### **Organização da dissertação**

Os capítulos que seguem apresentam o modelo e a análise de desempenho da rede e estão estruturados da seguinte forma. No Capítulo 2 apresenta-se o modelo desenvolvido para uma rede sem fio ad hoc com múltiplos saltos, que inclui características do canal de propagação, do sistema de transmissão, da topologia da rede e do tráfego em cada enlace. Os *resultados de saída* deste modelo são o atraso e a vazão médios nos enlaces de um salto (transmissor-receptor). No Capítulo 3 é apresentada a avaliação do desempenho de uma rede ad hoc empregando o modelo desenvolvido no capítulo anterior. Com base nos resultados de vazão e atraso, são investigados os compromissos envolvendo os parâmetros da rede, como esquema de modulação e distância de reuso do canal e os efeitos do canal no sinal transmitidos. Os resultados indicam as condições em que a rede terá o seu desempenho limitado pela interferência co-canal, ou pelo atraso na transmissão dos pacotes. Por fim, no Capítulo 4 são apresentadas as considerações finais e as propostas de trabalhos futuros.

# Capítulo 2

## Modelagem da rede ad hoc sem fio

Neste capítulo, é apresentado o desenvolvimento do modelo da rede ad hoc empregado na análise do desempenho. O desempenho da rede será medido por meio da *vazão* de pacotes e do *atraso* observado por um pacote. Para a formulação destas figuras de desempenho, será necessário antes adotar modelos para alguns aspectos da rede, e desenvolver formulações para alguns parâmetros da rede. Portanto, antes da formulação da vazão e do atraso, serão tratados os seguintes aspectos da rede:

- Modelagem do canal de propagação;
- Modelagem da topologia da rede;
- Caracterização do tráfego médio de cada enlace;
- Caracterização da relação sinal-interferência;
- Modelagem do sistema de transmissão.

### 2.1 Modelo do canal de propagação

Este estudo adota o modelo de propagação baseado na perda determinística por percurso da potência do sinal transmitido. Assim, a potência do sinal recebido  $P_r$  é dada por [10]

$$P_r = P_t \xi d_{tx}^{-\alpha}. \quad (2.1)$$

em que  $P_t$  é a potência do sinal transmitido,  $d_{tx}$  é a distância de separação entre o transmissor e o receptor,  $\alpha$  é o expoente de perda de percurso, e  $\xi$  é uma constante que inclui todos os parâmetros do sistema de transmissão que não variam com  $P_t$ ,  $\alpha$  e  $d_{tx}$ . A constante  $\xi$  tipicamente inclui a altura das antenas e a frequência de operação. Neste trabalho, será considerado que todos os enlaces de

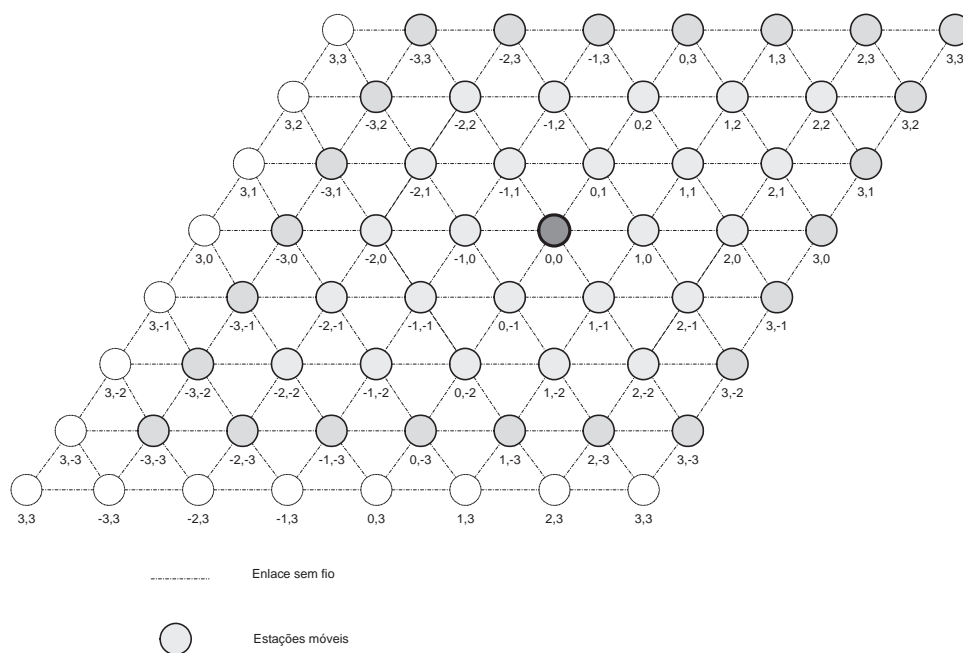


Fig. 2.1: Rede ad hoc com as estações dispostas segundo uma grade triangular.

comunicação apresentam o mesmo valor de  $\xi$ . O expoente  $\alpha$  depende do ambiente de propagação e pode variar de dois (espaço livre), até por volta de seis (regiões urbanas ou em ambientes fechados).

## 2.2 Topologia de rede

### 2.2.1 Estrutura toroidal

A rede modelada neste trabalho consiste em  $N$  estações (transmissor e receptor) espalhadas em uma área de serviço pré-estabelecida, seguindo uma grade triangular, com distância entre estações vizinhas igual a  $a$ . A Figura 2.1 ilustra um exemplo da rede. Cada estação da rede está associada a um gerador de pacotes, que são injetados na rede. É considerado que o processo de chegada de pacotes segue um processo Poissoniano, com taxa média de chegada igual a  $\lambda_m$  pacotes por segundo. Todas as estações da rede utilizam o mesmo canal de propagação (*sistema de canal único*), e uma estação não pode transmitir e receber ao mesmo tempo. Além disso, considera-se que uma estação consegue se comunicar apenas com um dos seus seis vizinhos imediatos, ou seja, a distância de separação entre transmissor e receptor é  $d_{tx} = a$ .

Dada a operação em canal único e o reuso do canal (como será discutido mais adiante), a interferência co-canal é a principal fonte de degradação da rede. Em um arranjo convencional para a área de serviço, as estações próximas às bordas da área de serviço observam um nível médio de interferência

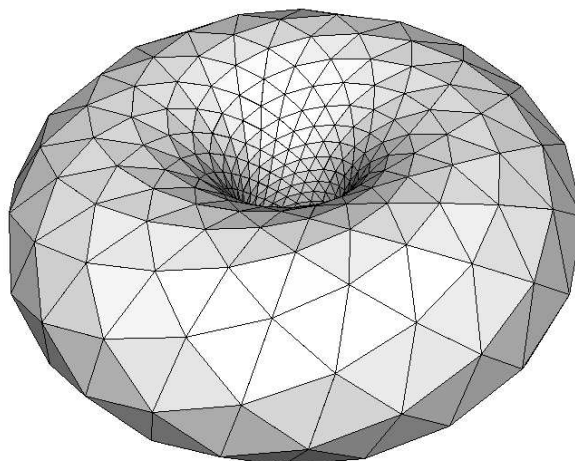


Fig. 2.2: Estrutura toroidal para uma rede.

menor do que aquelas no centro da área. Para evitar este desbarranco na interferência média e facilitar a formulação do desempenho da rede, adota-se uma estrutura *toroidal* para a rede, de forma que todas as estações observarão o mesmo nível médio de interferência. A formação de uma estrutura transversal faz com que as estações da última linha da rede mostrada na 2.1 sejam vizinhas das estações da primeira linha. Além disso, as estações da linha mais à esquerda tornam-se vizinhas das estações da linha mais à direita. Após estas operações, a rede adquire uma forma tridimensional, como ilustrado na Figura 2.2. A formação de uma estrutura toroidal, a partir de uma rede de dimensões finitas, tem o mesmo efeito que o agrupamento de réplicas da rede, como ilustra a Figura 2.3 para  $N = 9$ . Em uma estrutura toroidal, a vizinhança que uma estação observa (ou seja, o número de estações vizinhas e as suas posições com relação ao observador) passa a ser invariante com a posição da estação. Portanto, todas as estações têm o mesmo desempenho e a modelagem da rede para extrair figuras de desempenho pode ser baseada em apenas um enlace ou estação.

Para efeito de formulação, as posições das estações na rede são especificadas por meio dos índices  $(i, j)$  nos eixos da abscissa e ordenada, respectivamente, com o centro do sistema de coordenadas coincidindo com a estação central da rede. Neste trabalho, considera-se que as estações formam uma rede com o mesmo número de linhas e colunas. Além disso, por conveniência da modelagem matemática, considera-se que o número de linhas (ou colunas)  $\sqrt{N}$  assume apenas valores ímpares, de forma a sempre existir uma estação central. Portanto, podemos escrever que

$$N = (2K + 1)^2, \quad (2.2)$$

com  $K$  podendo assumir qualquer valor inteiro.

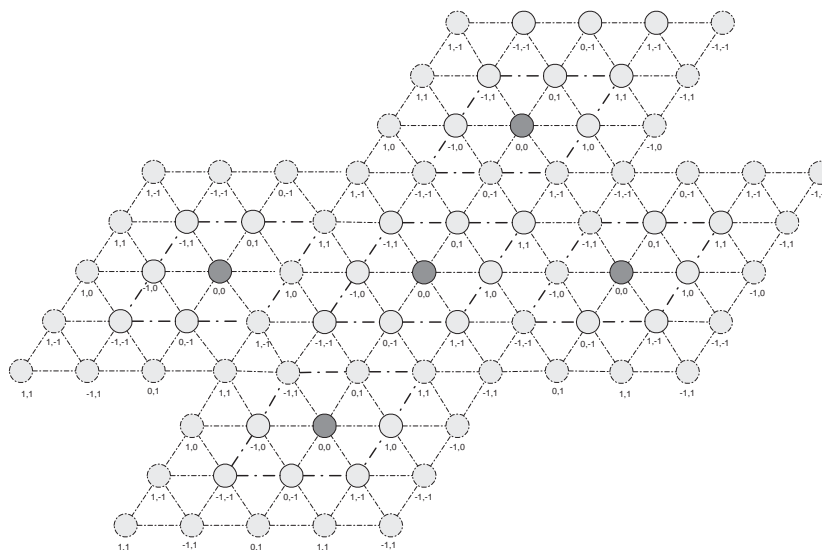
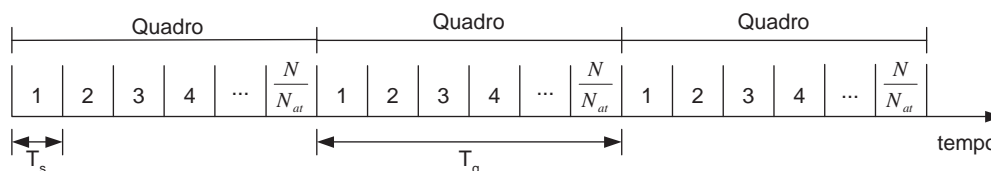
Fig. 2.3: Rede com  $N = 9$  estações com estrutura toroidal.

Fig. 2.4: Estrutura do quadro TDMA.

### 2.2.2 Técnica de Acesso

As estações da rede acessam o canal usando a técnica TDMA. Para controlar este acesso (ou seja, implementar a técnica TDMA), é suposta a existência de uma entidade controladora que opera alguma técnica de escalonamento temporal. Como forma de aumentar a capacidade da rede, enlaces transmissor-receptor que estejam suficientemente distantes uns dos outros podem estar ativos (ou seja, usar o canal rádio) simultaneamente. Portanto, o conjunto de  $N$  estações na rede é dividido em  $N/N_{at}$  sub-conjuntos de estações que transmitem simultaneamente, em que  $N_{at}$  é o número de estações que usam o mesmo *time-slot* simultaneamente. Portanto, assumindo que cada estação utiliza apenas um *time-slot* por quadro para transmitir o seu pacote, um quadro TDMA conterá  $N/N_{at}$  *time-slots*, como ilustra a Figura 2.4.

Supondo também que cada pacote tenha  $L_m$  bits e que a transmissão ocorra a uma taxa de  $R_b$  bits/s, então a duração do *time-slot*  $T_s$  e do quadro  $T_q$  valem, respectivamente,

$$T_s = \frac{L_m}{R_b}, \quad (2.3)$$

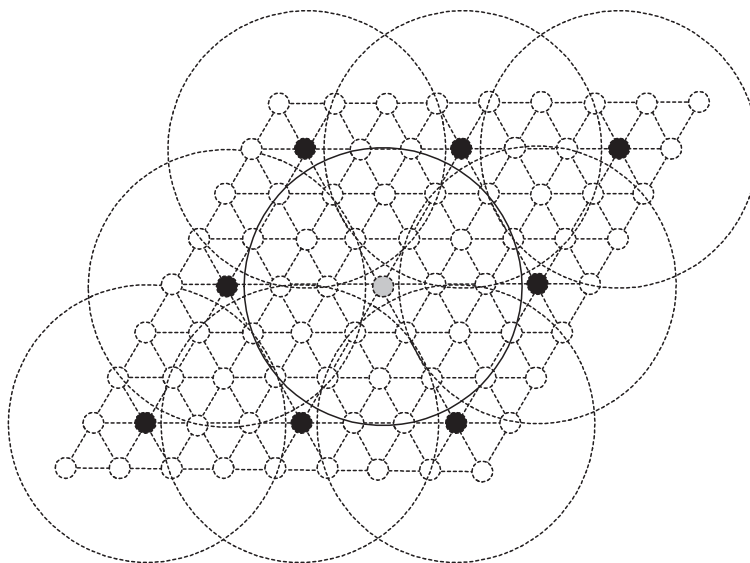


Fig. 2.5: Rede ad hoc com 81 estações, com distância de reuso  $d_r = 3$ . Círculos escuros representam estações transmissoras em um dado *time-slot*.

$$T_q = \frac{N}{N_{at}} \frac{L_m}{R_b}. \quad (2.4)$$

Consideraremos que o a técnica de escalonamento temporal das transmissões seleciona as estações que transmitirão no mesmo *time-slot*, de tal forma que estejam separadas uniformemente a uma distância  $D_r$ , denominada *distância entre estações transmissoras* ou *distância de reuso*. Normalizando em relação à distância mínima entre transmissores, temos  $d_r = D_r/a$ . A Figura 2.5 ilustra um exemplo para uma rede com  $N = 81$  estações, e distância de reuso  $d_r = 3$ . Para uma dada distância de reuso  $d_r$ , a rede é, então, dividida em grupos de  $N/d_r^2$  estações, sendo que apenas uma delas transmite a cada *time-slot*. Portanto, o número de estações ativas em um dado *time-slot* é igual ao número de grupos, ou seja

$$N_{at} = \frac{N}{d_r^2}. \quad (2.5)$$

Para garantir que a distância entre estações ativas seja uniforme, mesmo após a formação da estrutura toroidal, é necessário que o número de linhas (e colunas) na rede  $L = 2K + 1$  seja múltiplo da distância normalizada  $d_r$ . Esta restrição está ilustrada na Figura 2.6, para  $d_r = 3$ . Note que a distância entre estações transmissoras concomitantes é ainda três na junção das bordas. Portanto, dado que  $L$  deve ser ímpar, resulta que  $d_r$  e  $L/d_r$  devem ser ambos ímpares, o que limita as possibilidades para  $N_{at}$ . A Tabela 2.1 mostra os valores possíveis de  $N_{at}$  para alguns valores de  $N$ , em função da distância  $d_r$ .



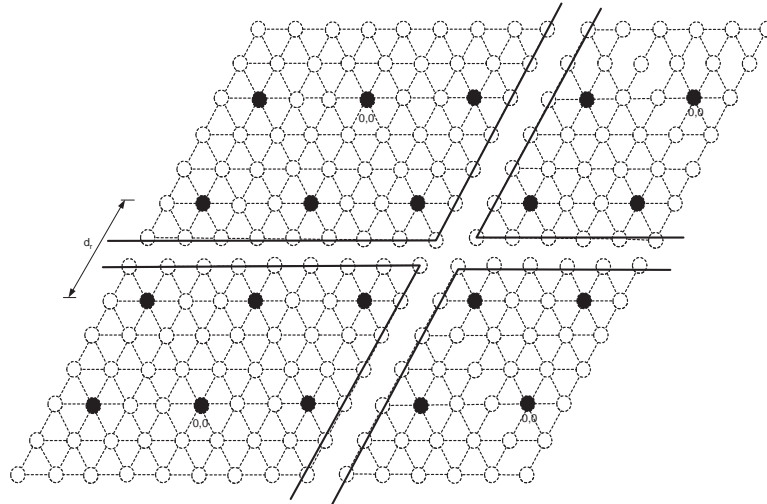


Fig. 2.6: Representação de uma rede ad hoc com  $N = 81$  após a formação da estrutura toroidal, com distância  $d_r = 3$ .

Tab. 2.1: Número de estações ativas  $N_{at}$  para alguns valores de número de estações na rede  $N$  e diferentes distâncias  $d_r$ .

$N$	$d_r = 3$	$d_r = 5$	$d_r = 7$	$d_r = 9$
225	25	9		
289				
361				
441	49		9	
529				
625		25		
729	81			9
841				
961				
1089	121			
1225		49	25	

## 2.3 Modelagem do Tráfego

Conforme já mencionado, cada estação está associada a uma aplicação que gera pacotes a uma taxa de  $\lambda_m$  pacotes por segundo. Considera-se que os pacotes gerados localmente em uma estação têm como destino qualquer outra estação da rede, com igual probabilidade. Como uma estação consegue se comunicar apenas com o seu vizinho imediato, enlaces de múltiplos saltos são formados, conectando a estação fonte a estação destino, caso este último esteja fora do alcance do primeiro. Designam-se tais enlaces de *enlaces fonte-destino (F-D)*, para diferenciá-los dos *enlaces transmissor-receptor (T-R)*. Portanto, uma rede com  $N$  estações terá  $N(N - 1)$  enlaces F-D e cada enlace F-D corresponderá em uma taxa de geração de pacotes igual a  $\lambda_m/(N - 1)$ .

A existência de enlaces de múltiplos saltos resulta no aumento da quantidade de pacotes que uma estação efetivamente transmite, uma vez que uma estação transmitirá pacotes gerados em outras estações. Assim, a quantidade de pacotes que uma estação efetivamente transmite por unidade de tempo, denotado por  $\lambda_{est}$ , dependerá da quantidade de pacotes gerados localmente (pacotes próprios) e da quantidade de pacotes que trafegam nos enlaces F-D que passam por aquela estação. Denotando o número médio de enlaces que passam por uma estação da rede por  $\bar{n}_r$ , temos, então,

$$\lambda_{est} = \frac{\lambda_m}{N - 1} \bar{n}_r + \lambda_m \quad (2.6)$$

$$= \left( \frac{\bar{n}_r}{N - 1} + 1 \right) \lambda_m. \quad (2.7)$$

Deve-se ressaltar que a taxa  $\lambda_{est}$  na expressão (2.7) está relacionada à quantidade de pacotes que *saem* de uma estação, e não a um enlace particular entre aquela estação e um dos seus seis vizinhos imediatos. Na seqüência, o parâmetro  $\bar{n}_r$  é determinado.

### Número médio de enlaces F-D que passam por uma estação

A determinação do parâmetro da rede  $\bar{n}_r$  é baseado aquela desenvolvida por [9]. São feitas as seguintes considerações:

1. Supõe-se a existência de um protocolo de roteamento que seleciona sempre a rota de menor número de saltos entre as estações fonte e destino. Se existirem duas ou mais rotas de mesmo tamanho, uma delas é selecionada aleatoriamente.
2. Cada estação é equipada com apenas uma fila, de tamanho infinito, que é utilizada por todos os pacotes que são transmitidos por aquela estação, independentemente da estação vizinha para a qual o pacote será transmitido.

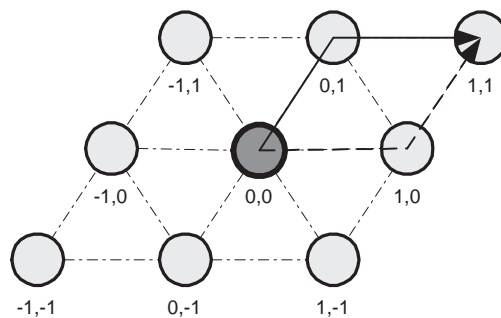


Fig. 2.7: Rede ad hoc com  $N = 9$  estações, onde estão representados os dois enlaces possíveis partindo da estação  $(0, 0)$  (fonte) até a estação  $(1, 1)$  (destino).

A consideração 2 acima implica em que todos os possíveis enlaces transmissor-receptor de uma estação (são seis no total) usam a mesma fila.

Dado que todas as estações da rede são semelhantes, devido ao uso da estrutura toroidal para a rede, a determinação  $\bar{n}_r$  será baseada na análise dos  $N - 1$  enlaces F-D partindo da estação central. Portanto, na análise, a estação fonte será sempre a estação  $(0, 0)$ . Além disso, para efeito de ilustração, considera-se uma rede com  $N = 9$  estações, mostrada na Figura 2.7, já planejada. A figura mostra que há dois caminhos de menor comprimento entre a estação  $(0, 0)$  (fonte) e a estação  $(1, 1)$ . Estendendo esta análise para outros destinos e outros valores de  $N$ , pode-se mostrar que o número de enlaces F-D de menor tamanho partindo da estação  $(0, 0)$  e chegando à estação  $(x, y)$  é dado por

$$n_t(x, y) = \frac{(x + y)!}{x!y!}. \quad (2.8)$$

Agora, considerando os enlaces F-D entre as estações  $(0, 0)$  e  $(x, y)$ , o número de vezes que a estação  $(i, j)$  é usada nestes enlaces é dado por:

$$n_p^{x,y}(i, j) = \frac{(i + j)!(x + y - i - j)!}{i!j!(y - j)!(x - i)!}. \quad (2.9)$$

Portanto, a taxa de utilização  $u(i, j)$  da estação  $(i, j)$  do enlace F-D é dada por:

$$u^{x,y}(i, j) = \frac{n_p^{x,y}(i, j)}{n_t(x, y)}. \quad (2.10)$$

A Tabela 2.2 exemplifica a aplicação destes resultados, para a rede mostrada na Figura 2.7.

Nesta tabela são mostrados os fatores de utilização  $u^{x,y}(i, j)$  de todas as estações da rede (exceto a estação central) para enlaces F-D partindo da estação central.

Tab. 2.2: Fator de utilização das estações da rede mostrada na Figura 2.7 para enlaces F-D partindo da estação (0, 0).

<b>Destinos</b>	<b>Estações intermediárias</b>							
	(1, 0)	(0, 1)	(-1, 0)	(0, -1)	(1, -1)	(1, 1)	(-1, 1)	(-1, -1)
(1, 0)	1							
(0, 1)		1						
(-1, 0)			1					
(0, -1)				1				
(1, -1)					1			
(1, 1)	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$				1		
(-1, 1)							1	
(-1, -1)			$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$				1
<b>Utilização</b>	<b>1,5</b>	<b>1,5</b>	<b>1,5</b>	<b>1,5</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>

O valor médio de utilização, considerando-se todas as  $N - 1$  estações e todos os possíveis destinos, para a estação (0, 0) como fonte, é dado por:

$$\bar{u}^{0,0} = \frac{1}{(N - 1)} \sum_{\forall x,y} \frac{n_p^{x,y}(i, j)}{n_t(x, y)} \quad (2.11)$$

Devemos, agora, estender esta análise para incluir os enlaces F-D que têm como estação fonte as outras  $N - 1$  estações da rede. Lembrando que, devido à estrutura toroidal, todas as estações têm o mesmo cenário à sua volta, o número médio de enlaces F-D passando por uma estação é:

$$\bar{n}_r = N \times \bar{u}^{0,0}. \quad (2.12)$$

Substituindo-se as expressões (2.8), (2.9), (2.11) na expressão (2.12), tem-se finalmente a forma final para  $\bar{n}_r$ :

$$\bar{n}_r = \frac{4N}{(N - 1)} \sum_{i=0}^K \sum_{j=1}^K \frac{(i + j)!}{i!j!} \sum_{x=i}^K \sum_{y=j}^K \frac{(x + y - i - j)!x!y!}{(x + y)!(x - i)!(y - j)!}, \quad (2.13)$$

com,  $(i + j) \neq 0, \forall x \geq i$  e  $\forall y \geq j$ . O fator 4 aparece devido ao fato dos limites dos somatórios atingirem apenas o primeiro quadrante do sistema de coordenadas de posicionamento das estações da rede.

Com isso, finalizamos a formulação que determina a taxa de geração de pacotes de uma estação.

## 2.4 Modelagem da camada física

### 2.4.1 Sistema de transmissão

Para o sistema de transmissão, supõem o uso do esquema de modulação M-QAM, operando em uma banda de largura  $B$  Hz. Portanto, a taxa de transmissão de bits é igual a

$$R_b = B \log_2 M. \quad (2.14)$$

Assumindo que a potência do ruído aditivo é desprezível e que a interferência é a principal fonte de erros na recepção, a probabilidade de erro de bit  $P_b$  média é dada por

$$P_b = 2 \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{3}{2} \frac{\overline{SIR}}{M-1}} \right), \quad (2.15)$$

em que,  $M = 2, 4, \dots$  é a ordem da modulação, e  $\overline{SIR}$  é o valor médio da relação sinal-interferência medida no receptor, que é calculada no próximo ítem.

Considerando que os pacotes transmitidos têm tamanho  $L_m$  bits, a probabilidade de erro de pacote é:

$$P_{pct} = 1 - (1 - P_b)^{L_m}. \quad (2.16)$$

### 2.4.2 Relação sinal-interferência

Esta seção descreve a modelagem adotada para o valor médio da relação sinal-interferência necessário para o cálculo da probabilidade de erro de bit em (2.15). Devido à estrutura toroidal, podemos considerar nesta análise apenas a  $SIR$  medida na estação central, pois este valor será observado em qualquer outra estação.

Inicia-se a análise lembrando que, a cada intervalo de *time-slot*, das  $N$  estações da rede, apenas  $N_{at}$  estações estão ativas e, portanto, produzindo interferência. No entanto, nem todas as  $N_{at}$  estações estarão, de fato, transmitindo naquele *time-slot*. Uma estação estará transmitindo com a mesma probabilidade de que haja pacotes na sua fila. Por sua vez, a probabilidade de haver pacotes em uma fila para o caso da técnica TDMA é dada pelo produto da taxa de geração de pacotes da estação  $\lambda_{est}$  e o intervalo de quadro  $T_q$ , ou seja

$$p_{at} = \lambda_{est} \frac{N}{N_{at}} \frac{L_m}{B \log_2 M}. \quad (2.17)$$

Portanto, a atividade da  $i$ -ésima estação interferente pode ser modelada por meio de uma variável

aleatória binomial  $\kappa_i$ , que pode assumir os valores 0 e 1, com valor médio

$$E \{ \kappa_i \} = p_{at} \quad \forall i \in \Omega, \quad (2.18)$$

em que  $\Omega$  é o conjunto de estações ativas concomitantemente, com  $|\Omega| = N_{at}$ . Assumindo que os sinais interferentes somam-se de forma não coerente, então a potência total da interferência  $P_I$  medida em um receptor teste no centro da rede é

$$P_I = \sum_{i \in \Omega} \kappa_i P_{t,i} d_i^{-\alpha}, \quad (2.19)$$

em que  $P_{t,i}$  é a potência de transmissão do  $i$ -ésimo transmissor interferente, e  $d_i$  é a distância entre o receptor de teste e o  $i$ -ésimo transmissor interferente. Portanto, a potência  $P_I$  é uma variável aleatória, devido à atividade das estações interferentes.

Considera-se que todas as estações transmitem com a mesma potência de transmissão  $P_t$ , e que todos os outros parâmetros do modelo de propagação são iguais para todas as estações. Portanto, a relação sinal-interferência medida no receptor teste a qualquer instante pode ser escrita como

$$SIR = \frac{d_{tx}^{-\alpha}}{\sum_{i \in \Omega} \kappa_i d_i^{-\alpha}} \quad (2.20)$$

em que  $d_{tx}$  é a distância entre o receptor de teste e o seu respectivo transmissor. Da mesma forma que  $P_I$ , a relação  $SIR$  é também uma variável aleatória, pois o número de transmissores que efetivamente transmitem em um dado *time-slot* varia de acordo com a variável binomial  $\kappa_i$ .

Para calcular o valor médio de  $SIR$ , supõe-se o caso em que apenas  $k$  estejam ativos. Existem, portanto,  $L_k$  possíveis combinações de  $k$  transmissores ativos, com

$$L_k = \binom{N_{at}}{k}. \quad (2.21)$$

A relação sinal-interferência medida em um receptor em cada uma destas combinações será denotada por  $SIR_j^{(k)}$ , com  $j = 1, 2, \dots, L_k$ . Dado que as distâncias  $d_i$  são diferentes para diferentes valores de  $i$ , então

$$SIR_j^{(k)} \neq SIR_l^{(k)}, \quad \text{para } j \neq l. \quad (2.22)$$

Supondo que todas as combinações de  $k$  estações ativas têm a mesma probabilidade de ocorrer,

então o valor médio de  $SIR_j^{(k)}$  é dado por

$$\overline{SIR}^{(k)} = \frac{1}{L_k} \sum_{j=1}^{L_k} SIR_j^{(k)}. \quad (2.23)$$

Por fim, o valor médio de  $SIR$ , considerando-se todos os valores possíveis de  $k$ , é dado por

$$\overline{SIR} = \sum_{j=0}^{N_{at}} \mathbb{P}\{j = k\} \overline{SIR}^{(k)}, \quad (2.24)$$

em que  $\mathbb{P}\{j = k\}$  é a probabilidade de  $k$  estações estarem ativas, que é igual a

$$\mathbb{P}\{j = k\} = \binom{N_{at}}{k} p_{at}^k (1 - p_{at})^{N_{at}-k}. \quad (2.25)$$

Portanto, analisando a expressão (2.24) e as expressões auxiliares (2.20), (2.23) e (2.25), conclui-se que o valor médio  $\overline{SIR}$  depende dos seguintes fatores:

- número de estações ativas concomitantemente  $N_{at}$ ;
- praticabilidade de ativação do transmissor  $p_{at}$ ;
- distância de separação entre transmissor e receptor  $d_{tr}$ ;
- distância entre estações ativas concomitantes  $d_r$ , pois as distâncias  $d_i$  em (2.20) dependem de  $d_r$ ;
- expoente de perda de percurso  $\alpha$ .

A expressão (2.24) também indica que, exceto para valores pequenos de  $N_{at}$ , o cálculo de  $\overline{SIR}$  é computacionalmente intenso. Isto decorre do fato de que consideram-se as  $L_k = N_{at}! / [(N_{at} - k)! k!]$  possíveis combinações de  $k$  estações ativas. Por outro lado, a determinação de  $\overline{SIR}$  por meio de uma análise estatística mostrou-se complexa, envolvendo um problema aparentemente aberto segundo a literatura consultada. Desta forma, optou-se pela determinação da função

$$\overline{SIR} = f(N_{at}, p_{at}, d_{tr}, d_r, \alpha) \quad (2.26)$$

por meio de ajuste de curvas com base em valores de  $\overline{SIR}$  gerados por simulação.

Para a geração dos valores de  $\overline{SIR}$  por simulação, é suposto um número grande de estações na rede, de forma que o número de estações ativas também será grande. Portanto, pode-se diminuir a

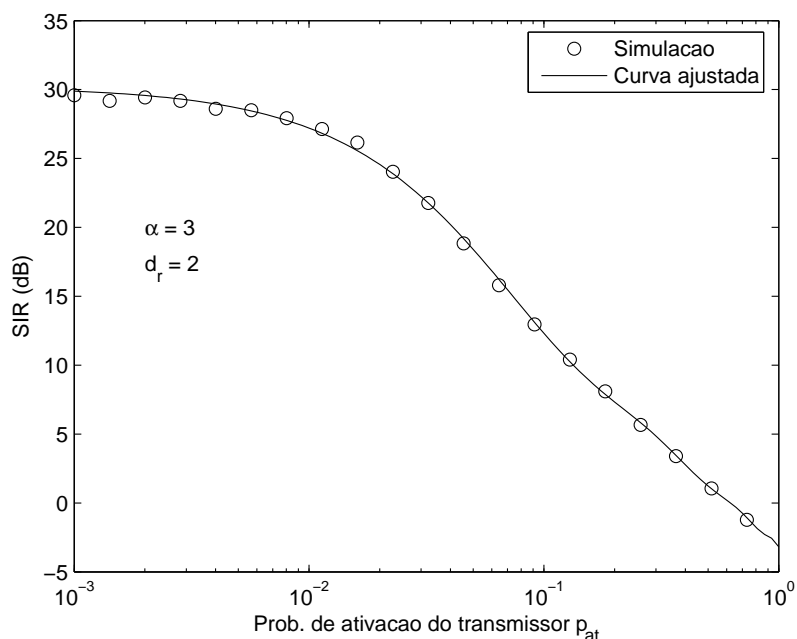


Fig. 2.8:  $\overline{SIR}$  em função de  $p_{at}$ , para  $d_r = 2$  e  $\alpha=3$ : curva ajustada e valores de simulação.

dependência de  $\overline{SIR}$  com o valor de  $N_{at}$ . Note-se, no entanto, que a curva obtida fornecerá valores de  $\overline{SIR}$  menores do que o realmente encontrado na rede. Além disso, assume-se que um transmissor se comunica apenas com um dos seus vizinhos, tal que  $d_{tr} = a$ . Assim, a função a ser determinada é

$$\overline{SIR} = f(p_{at}, d_r, \alpha). \quad (2.27)$$

Usando simulação, os valores médios (entre 5000 amostras)  $\overline{SIR}$  foram determinados para as diversas combinações da tripla  $(p_{at}, d_r, \alpha)$ , na faixa de interesse deste trabalho. Em seguida, foram ajustadas curvas para o valor médio de  $\overline{SIR}$  em função da probabilidade de ativação  $p_{at}$ , parametrizadas pela distância  $d_r$  e expoente  $\alpha$ .

Como ilustração, a curva ajustada para  $\overline{SIR}$ , expresso em dB, para  $d_r = 2$  e  $\alpha = 3$  resultou na função de  $p_{at}$

$$10 \log [\overline{SIR}(p_{at})] = 10(-0.0793p_{at}^8 - 263.04p_{at}^7 + 1048.48p_{at}^6 + \quad (2.28)$$

$$-1706.94p_{at}^5 + 1463.31p_{at}^4 - 711.19p_{at}^3 + \quad (2.29)$$

$$+198.0p_{at}^2 - 31.88p_{at} + 3.02). \quad (2.30)$$

A Figura 2.8 mostra os pontos obtidos por simulação para os valores médios e a curva ajustada para  $\overline{SIR}$ . Também com propósito de ilustração, a Figura 2.9 mostra os valores estimados de  $\overline{SIR}$



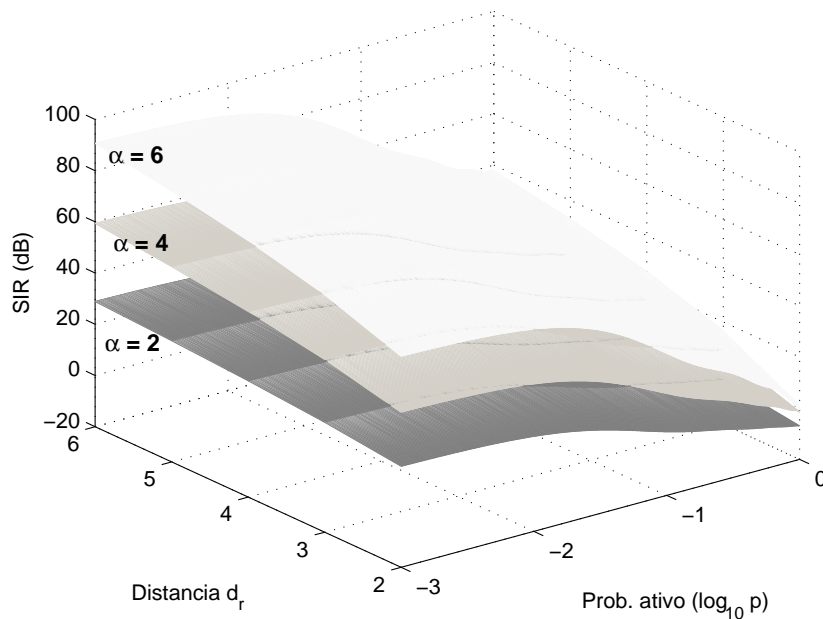


Fig. 2.9:  $\overline{SIR}$  em função da probabilidade  $p_{at}$ , da distância  $d_r$  e  $\alpha$ .

para diferentes valores de  $\alpha$ , em função de  $d_r$  e  $p_{at}$ .

## 2.5 Vazão Efetiva

Para a análise da vazão, usa-se como medida a quantidade de pacotes que saem de um transmissor e chegam corretamente a um receptor, por intervalo de quadro. Esta medida, que denominaremos *vazão efetiva*  $\eta$ , é calculado por:

$$\eta = \lambda_{est} T_q (1 - P_{pct}), \quad (2.31)$$

em que  $\lambda_{est}$  é a quantidade de pacotes por segundo que saem de um transmissor,  $T_q$  é o intervalo de quadro e  $P_{pct}$  é a probabilidade de erro de pacote em um enlace transmissor-receptor. Note que cada estação pode transmitir para qualquer um dos seus seis vizinhos, e a vazão efetiva considera todos os pacotes transmitidos pela estação.

## 2.6 Modelagem do Atraso

### 2.6.1 Atraso médio em um enlace transmissor-receptor

O atraso observado por um pacote em um enlace transmissor-receptor é definido como o intervalo de tempo entre a chegada do pacote no transmissor e a sua chegada no receptor desejado. Lembrando que a técnica de acesso adotada na rede é o TDMA, a rede pode ser modelada como um sistema *fila + servidor* com *taxa de chegada de pacotes*  $\lambda_{est}$  dado por (2.7) e *tempo médio de serviço* igual à duração do quadro  $T_q$ , dada por (2.4), repetidos aqui por conveniência:

$$\lambda_{est} = \left( \frac{\bar{n}_r}{N-1} + 1 \right) \lambda_m, \quad (2.32)$$

$$T_q = \frac{N}{N_{at}} \frac{L_m}{R_b}. \quad (2.33)$$

Seguindo o trabalho de Shrader et al. [7], usaremos neste trabalho o *Princípio da Independência* [8], e consideraremos que o processo de chegada de pacotes em um dado enlace é independente dos atrasos e dos processos de chegada dos enlaces vizinhos. Assim, o processo de chegada de pacotes de cada estação é assumido Poissoniano de média  $\lambda_{est}$  e as estações são modeladas como um sistema de filas do tipo M/D/1.

Portanto, desprezando o atraso de propagação, o atraso médio observado em um enlace transmissor-receptor, denotado por  $\bar{\tau}_{tr}$ , possui três componentes,

$$\bar{\tau}_{tr} = W_q + T_{tx} + T_e, \quad (2.34)$$

definidos como segue:

- *Tempo médio de espera na fila*  $W_q$ , que é igual ao atraso na fila em um sistema M/D/1 com taxa de chegada  $\lambda_{est}$  e tempo médio de serviço  $1/\mu = T_q$ , ou seja

$$W_q = \frac{\rho}{2(1-\rho)} T_q, \quad (2.35)$$

com  $\rho = \lambda_{est} T_q$ ;

- *Tempo de transmissão de um pacote*  $T_{tx}$ , que é o tempo necessário para transmitir um pacote de  $L_m$  bits à taxa  $R_b$ , ou seja

$$T_{tx} = \frac{L_m}{R_b}, \quad (2.36)$$

note que  $T_{tx}$  é a duração de um *time-slot*.

- Tempo de médio de espera para iniciar a transmissão  $T_e = T_q/2$ .

Portanto, rearranjando os termos, o atraso  $\bar{\tau}_{tr}$  médio entre a estação transmissora e a estação receptora é dado por:

$$\bar{\tau}_{tr} = \frac{L_m}{R_b} \left\{ \frac{N}{N_{at}} \left[ \frac{1}{2(1-\rho)} \right] + 1 \right\}. \quad (2.37)$$

### 2.6.2 Atraso médio em um enlace fonte-destino

Consideraremos agora o atraso médio observado por um pacote entre a estação fonte e a estação destino. Este atraso, denotado por  $\bar{\tau}_{fd}$ , é, portanto, o tempo médio que o pacote permanece na rede.

O atraso que um dado pacote observa em um enlace fonte-destino é a soma dos atrasos em cada enlace transmissor-receptor que compõem este enlace fonte-destino. Devido à estrutura toroidal da rede, todos os enlaces transmissor-receptor têm as mesmas características, de forma que o valor médio  $\bar{\tau}_{fd}$  pode ser escrito como

$$\bar{\tau}_{fd} = \bar{n}_h \times \bar{\tau}_{tr}, \quad (2.38)$$

em que  $\bar{n}_h$  é o número médio de saltos entre as estações fonte e destino, cuja formulação é apresentada a seguir.

#### Número de saltos em um enlace F-D

Conforme já mencionado, supõe-se a existência de um protocolo de roteamento que seleciona um enlace F-D (ou rota) de menor número de saltos e que cada estação pode se comunicar apenas com as suas estações vizinhas imediatas.

Como todas as estações na rede com estrutura toroidal são semelhantes e lembrando que cada estação tem pacotes para serem enviados a todas as outras  $N - 1$  estações, o valor médio de saltos dos enlaces partindo de um dado enlace independe da estação fonte. Assim, o número médio de saltos  $\bar{n}_h$  será igual ao número médio de saltos dos enlaces partindo da estação central.

Consideram-se a Figura 2.10 que mostra uma rede com  $N = 25$  estações, e que foi dividida em quatro quadrantes. De acordo com o sistema de coordenadas indicado, a estação central é indicada como  $(0, 0)$ . Considera-se alguns exemplos de enlaces F-D em cada quadrante com a estação  $(0, 0)$  como estação fonte. Para o primeiro e o terceiro quadrantes, tem-se:

- Entre a estação  $(0, 0)$  e a estação  $(2, 2)$  há seis enlaces de menor número de saltos, cada um deles com quatro saltos;
- Supondo agora a estação  $(-2, -1)$  como destino, são três enlaces de menor número de saltos, com 3 saltos.

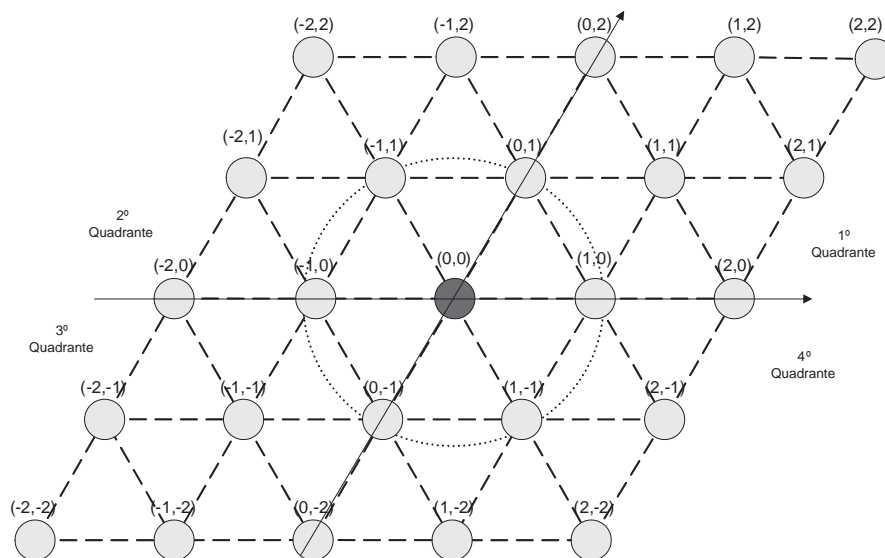


Fig. 2.10: Rede ad hoc com 25 estações com a estação Fonte  $(0, 0)$  e a distância  $d_{tx} = a$ .

Tomando-se outros exemplos para estações destinos nos primeiro e terceiro quadrantes, pode-se mostrar que, para qualquer estação  $(x, y)$  nestes dois quadrantes, o número de saltos dos enlaces partindo da estação  $(0, 0)$  é dado por

$$n_h = (|x| + |y|). \quad (2.39)$$

Consideram-se agora alguns exemplos de enlaces com estações destino no segundo e o quarto quadrantes, partindo da estação  $(0, 0)$ :

- Até a estação  $(-1, 2)$  há dois caminhos diferentes de menor número de saltos, cada um deles com dois saltos;
- Até a estação  $(2, -1)$  há dois caminhos diferentes de menor número de saltos, cada um deles com dois saltos.

Portanto, pode-se mostrar também que o número de saltos dos enlaces partindo da estação  $(0, 0)$  e chegando até qualquer estação  $(x, y)$  no segundo ou quarto quadrantes é igual a

$$n_h = \max(|x|, |y|). \quad (2.40)$$

Finalmente, o número médio de saltos de qualquer estação fonte para qualquer estação destino na rede é igual a:

$$\bar{n}_h = \frac{2}{(N-1)} \left[ \sum_{x=0}^K \sum_{y=1}^K (x+y) + \sum_{x=-K}^{-1} \sum_{y=0}^K \max(|x|, |y|) \right], \quad (2.41)$$

com,  $(x+y) \leq (K+1)$ .

## 2.7 Visão geral da modelagem da rede e sumário dos parâmetros

Esta seção apresenta um resumo da modelagem da rede, com as expressões derivadas:

### Parâmetros de entrada

- Número de estações na rede:  $N = (2K + 1)^2$ , com  $K = 1, 2, \dots$
- Distância entre estações vizinhas:  $a$
- Distância normalizada entre estações ativas concomitantemente:  $d_r$
- Taxa de geração de pacotes por estação:  $\lambda_m$  pacotes/s
- Número de bits por pacote:  $L_m$
- Distância entre transmissor e receptor:  $d_{tx} = a$
- Banda disponível:  $B$  Hz
- Ordem da modulação:  $M$
- Expoente de perda de percurso:  $\alpha$

### Cálculos

- Número de estações ativas  $N_{at} = N/d_r^2$
- Número médio de saltos entre fonte e destino:

$$\bar{n}_h = \frac{2}{(N-1)} \left[ \sum_{x=0}^K \sum_{y=1}^K (x+y) + \sum_{x=-K}^{-1} \sum_{y=0}^K \max(|x|, |y|) \right]$$

- Número médio de enlaces F-D passando em uma estação:

$$\bar{n}_r = \frac{4N}{(N-1)} \sum_{i=0}^K \sum_{j=1}^K \frac{(i+j)!}{i!j!} \sum_{x=i}^K \sum_{y=j}^K \frac{(x+y-i-j)!x!y!}{(x+y)!(x-i)!(y-j)!}$$

- Taxa de chegada de pacotes em uma estação:

$$\lambda_{est} = \left( \frac{\bar{n}_r}{N-1} + 1 \right) \lambda_m$$

- Duração de um quadro do TDMA:

$$T_q = \frac{N}{N_{at}} \frac{L_m}{B \log_2 M}$$

- Probabilidade de ativação de uma estação:

$$p_{at} = \lambda_{est} T_q$$

- Relação sinal-interferência *SIR*: por meio de função ajustada

$$SIR = f(d_r, \alpha, p_{at})$$

- Probabilidade de erro de bit do M-QAM:

$$P_b = 2 \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{3}{2} \frac{SIR}{M-1}} \right)$$

- Probabilidade de erro de pacote:

$$P_{pct} = 1 - (1 - P_b)^{L_m}$$

- Atraso médio total em enlaces transmissor-receptor:

$$\bar{\tau}_{tr} = \frac{L_m}{R_b} \left\{ \frac{N}{N_{at}} \left[ \frac{1}{2(1-\rho)} \right] + 1 \right\}$$

em que  $\rho$  é

$$\rho = \lambda_{est} T_q$$

- Atraso médio total em enlaces fonte-destino:

$$\bar{\tau}_{fd} = \bar{n}_h \bar{\tau}_{tr}$$

- Vazão efetiva:

$$\eta = \rho (1 - P_{pct})$$

Tab. 2.3: Parâmetros da rede mantidos fixos.

Parâmetro	Valor
Números de estações na rede	$N = 225$
Distância entre transmissores concomitantes	$d_r = 3$ e $5$
Duração do <i>time-slot</i>	$T_s = 0.1\text{s}$

## 2.8 Validação do modelo para o cálculo do atraso

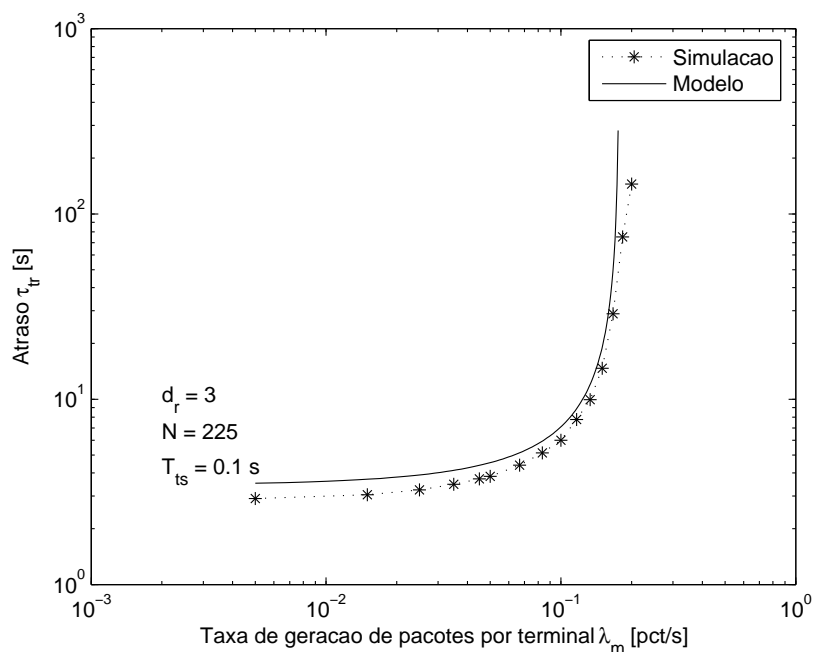
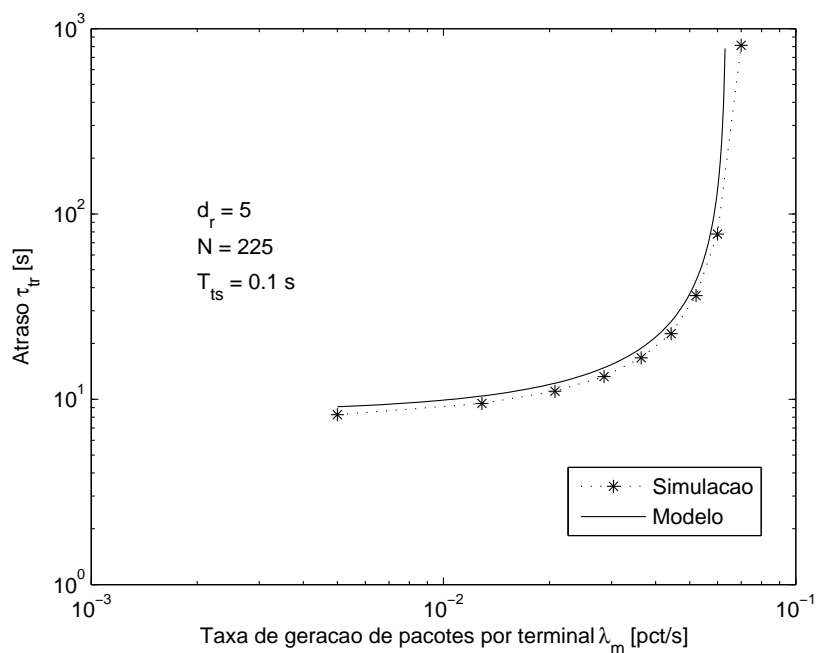
Nesta seção são apresentados resultados de validação da modelagem do atraso definida na Seção 2.6, em particular da expressão (2.37) para o cálculo do atraso  $\bar{\tau}_{tr}$ . A validação foi feita comparando-se os resultados de atraso obtidos por (2.37) com resultados de simulação de uma rede construída com base nos mesmos modelos descritos na Seção 2.2. Na simulação realizada, o efeito da modulação foi incluído com a fixação do valor da duração do *time-slot*  $T_s$ .

As características da rede simulada estão mostradas na Tabela 2.3. Para  $N = 225$  estações na rede, o número médio de rotas passando por uma estação é  $\bar{n}_r = 1182,3$ , e o número médio de saltos nos enlaces F-D é  $\bar{n}_h = 6,25$ .

### Procedimento de simulação

- Cada estação gera pacotes com intervalos entre chegadas de pacotes seguindo uma distribuição exponencial negativa de valor médio  $1/\lambda_m$ ;
- O comprimento  $n_h$  de cada enlace F-D segue uma distribuição extraída por meio de simulação prévia, que tem valor médio dado por (2.41);
- Um pacote ao ser gerado na sua estação fonte tem o comprimento  $n_h$  do seu enlace F-D sorteado de acordo com a distribuição citada no ítem anterior. Aquele pacote permanece na rede até completar o número de saltos sorteado;
- O atraso  $\tau_{fd}$  de um pacote é a diferença entre a marca do relógio do simulador no instante em que ele completa o seu último enlace transmissor-receptor e a marca do relógio no momento de sua geração;
- Como no modelo analítico da rede, cada estação possui apenas uma fila, para todos os seus enlaces transmissor-receptor.

As Figuras 2.11 e 2.12 mostram os resultados da validação, para  $d_r = 3$  e  $d_r = 5$  respectivamente. Cada ponto da curva dos resultados de simulação corresponde à média de  $10^4$  pacotes. Observa-se

Fig. 2.11: Resultados de validação da modelagem do atraso na rede:  $N = 225$ ,  $T_{ts} = 0,1$  s e  $d_r = 3$ .Fig. 2.12: Resultados de validação da modelagem do atraso na rede:  $N = 225$ ,  $T_{ts} = 0,1$  s e  $d_r = 5$ .



nas figuras a boa concordância entre os valores do modelo e os da simulação, o que indica a validade do Princípio da Independência usado na derivação do modelo analítico.

# Capítulo 3

## Análise do Desempenho

Neste capítulo é apresentada a análise do desempenho de uma rede ad hoc empregando a formulação desenvolvida no capítulo anterior. O desempenho da rede ad hoc será medido por meio dos valores médios da vazão e do atraso. De acordo com a modelagem desenvolvida, estas medidas dependem de diversos parâmetros da rede. No estudo apresentado neste capítulo, será dada atenção particular à influência na vazão e no atraso dos seguintes parâmetros da rede:

- distância  $d_r$  entre as estações transmissoras concomitantes;
- expoente de perda de percurso  $\alpha$ ;
- ordem da modulação  $M$ ;
- taxa de geração de pacotes por estação  $\lambda_m$ .

Os demais parâmetros da rede que integram a modelagem serão mantidos fixos, ajustados para os valores mostrados na Tabela 3.1. O valor  $N = 11025$  para o número de estações na rede foi selecionado para permitir o ajuste do valor da distância  $d_r$  para os valores 3, 5 e 7, e os respectivos valores para o número de estações transmissoras concomitantes  $N_{at}$  são mostrados na Tabela 3.2. Além disso, com  $N = 11025$  estações na rede, cada estação será percorrida por  $\bar{n}_r = 534035$  enlaces F-D em média.

### 3.1 Avaliação do atraso

Conforme a formulação apresentada no Capítulo 2, o tempo médio de atraso  $\bar{\tau}_{tr}$  em um enlace transmissor-receptor é a soma de três componentes, repetidos aqui por conveniência:

$$\bar{\tau}_{tr} = T_{tx} + W_q + T_e \quad (3.1)$$

Tab. 3.1: Parâmetros da rede mantidos fixos.

Parâmetro	Valor
Números de estações na rede $N$	11025
Máxima probabilidade de erro de pacote aceitável $P_{pct,max}$	1%
Tamanho do pacote $L_m$	1000 bits
Largura de faixa disponível $B$	1 MHz
Número médio de saltos em um enlace F-D $\bar{n}_h$	43,75

Tab. 3.2: Número de estações transmissoras concomitantes  $N_{at}$  na rede para  $N = 11025$  para os valores de  $d_r$  considerados neste estudo.

Distância $d_r$	Número de transmissores $N_{at}$
3	1225
5	441
7	225

em que

- $T_{tx}$  é o tempo de transmissão do pacote

$$T_{tx} = \frac{L_m}{B \log_2 M}; \quad (3.2)$$

- $W_q$  é o tempo médio de espera na fila

$$W_q = \frac{\rho T_q}{2(1 - \rho)}, \quad (3.3)$$

com

$$\rho = \left( \frac{\bar{n}_r}{N - 1} + 1 \right) \lambda_m \frac{N}{N_{at}} \frac{L_m}{B \log_2 M} \quad (3.4)$$

e  $T_q$  é a duração do quadro TDMA e vale

$$T_q = \frac{N}{N_{at}} \frac{L_m}{B \log_2 M}; \quad (3.5)$$

- $T_e$  é o tempo médio de espera no quadro

$$T_e = 0,5T_q. \quad (3.6)$$

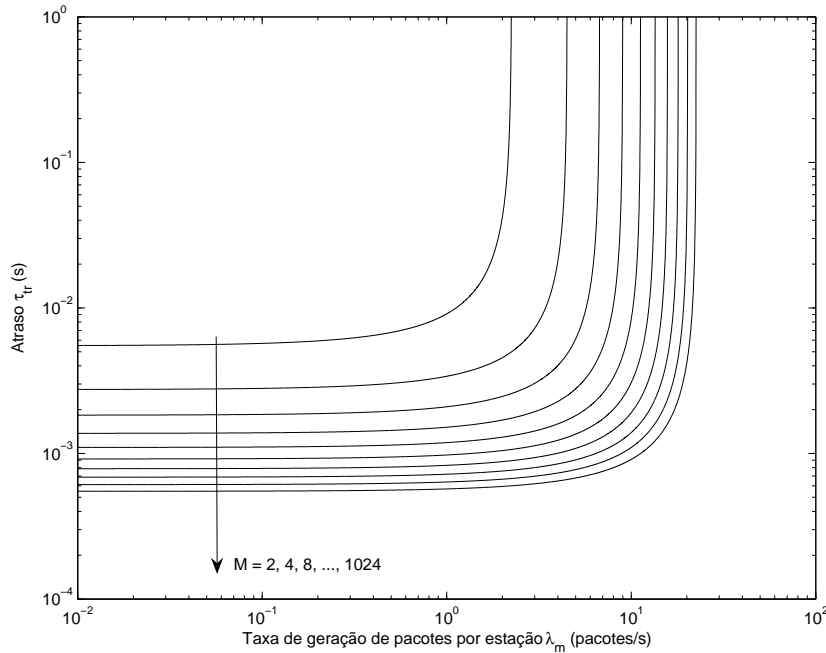


Fig. 3.1: Atraso médio  $\bar{\tau}_{tr}$  para distância  $d_r = 3$ , expoente de perda de percurso  $\alpha = 3$  e diferentes ordens de modulação.

Conforme discutido no Capítulo 2, o atraso no enlace fonte-destino é o calculado como  $\bar{\tau}_{fd} = \bar{n}_h \bar{\tau}_{tr}$ , em que  $\bar{n}_h$  é o número médio de saltos nos enlaces F-D. Porém como  $\bar{n}_h$  varia com o número de terminais na rede e com o alcance de transmissão, que são mantidos constantes nesta análise, optou-se por avaliar apenas o atraso no enlace transmissor-receptor  $\bar{\tau}_{tr}$ .

A Figura 3.1 mostra o atraso médio  $\bar{\tau}_{tr}$  em função da taxa de geração de pacotes por estação  $\lambda_m$  para expoente de perda de percurso  $\alpha = 3$ , distância entre transmissores  $d_r = 3$  e diversos valores de ordens de modulação  $M$ . Para valores pequenos de taxa de geração de pacotes  $\lambda_m$  o atraso médio é dominado pelo atraso de transmissão  $T_{tx}$  e pelo atraso médio de espera no quadro  $T_e$ , resultando em um valor baixo de atraso. Nota-se, portanto, que o atraso para  $\lambda_m$  pequeno dependerá apenas do nível da modulação.

Com o aumento da taxa de geração de pacotes, o tempo de espera na fila  $W_q$  tende a dominar o atraso médio total, que será tanto maior quanto maior for a taxa de geração de pacotes. Quando o fator de ocupação (ou tráfego)  $\rho$  em (3.3) se aproxima da unidade com o aumento de  $\lambda_m$ , o tempo de espera na fila  $W_q$  e, conseqüentemente,  $\bar{\tau}_{tr}$  crescem rapidamente. Nota-se que há um valor limite de  $\lambda_m$ , denotado aqui por  $\lambda_m^{at}$ , que leva o atraso médio para infinito. O valor de  $\lambda_m^{at}$  corresponde a  $\rho = 1$ , e pode ser calculado por meio da expressão (3.4), ou seja

$$\lambda_m^{at} = \frac{N - 1}{\bar{n}_r + (N - 1)} \frac{N_{at} B \log_2 M}{N L_m}. \quad (3.7)$$

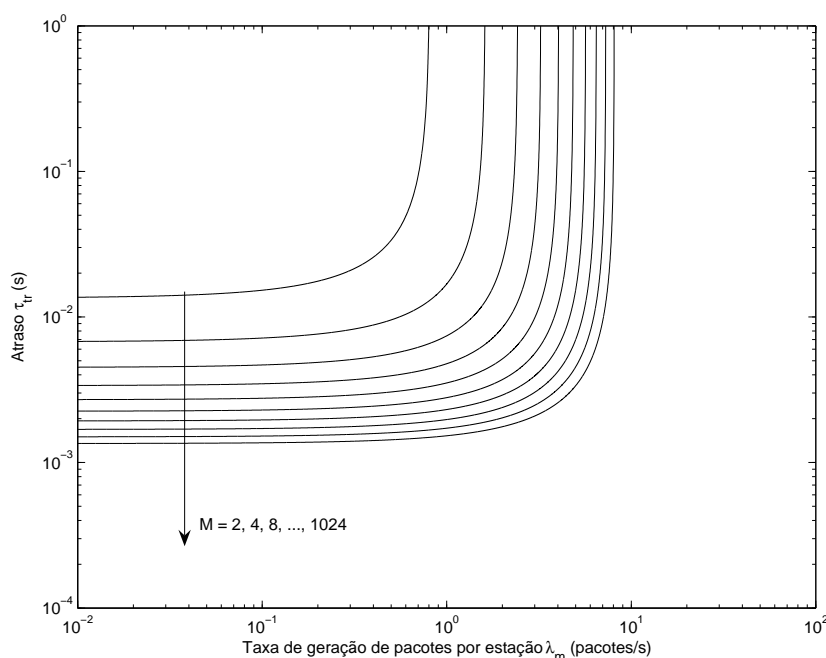


Fig. 3.2: Atraso médio  $\bar{\tau}_{tr}$  para distância  $d_r = 5$ , expoente de perda de percurso  $\alpha = 3$  e diferentes ordens de modulação.

Este valor máximo para a taxa de geração de pacotes por estação impõe uma limitação ao desempenho da rede ad hoc *devido ao atraso*, e será melhor investigado mais adiante.

Quando a distância entre transmissores concomitantes é aumentada para  $d_r = 5$ , ocorre um aumento no atraso médio na rede, como mostra a Figura 3.2. O aumento na distância  $d_r$  provoca a diminuição do número de estações transmissoras concomitantes, o que exige um tempo de quadro  $T_q$  maior. Este maior tempo de quadro provoca um aumento no atraso médio. Comparando os resultados das Figuras 3.1 e 3.2, nota-se também uma redução no máximo valor de taxa de geração de pacotes, quando o valor de  $d_r$  passa de 3 para 5, o que também é devido ao aumento no tempo de quadro.

As curvas para  $d_r = 7$  são semelhantes àsquelas mostradas para  $d_r = 3$  e 5, exceto pelo fato de indicarem atrasos maiores, e não serão apresentadas aqui. Por sua vez, o expoente de perda de percurso não afeta o atraso médio dos pacotes, uma vez que não são consideradas aqui retransmissões de pacotes recebidos com erro.

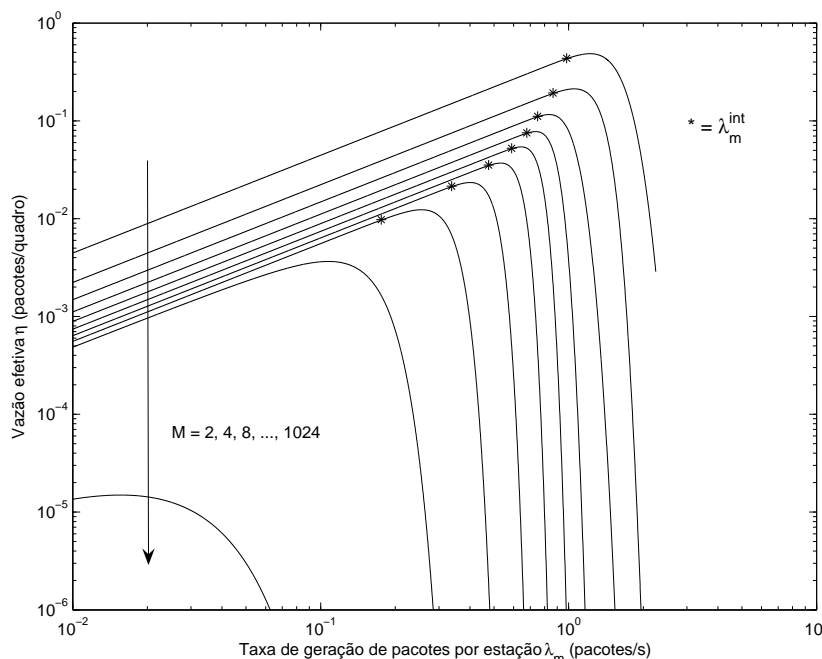


Fig. 3.3: Vazão efetiva em um enlace transmissor-receptor para  $d_r = 3$ ,  $\alpha = 3$  e diferentes ordens de modulação. Os asteriscos (\*) indicam o valor  $\lambda_m$  que provoca  $P_{pct} = 1\%$ .

## 3.2 Avaliação da vazão

A vazão efetiva  $\eta$  de um enlace entre um transmissor e um receptor, que considera apenas os pacotes recebidos corretamente, é dada por

$$\eta = \lambda_{est} T_q (1 - P_{pct}) \quad (3.8)$$

$$= \rho (1 - P_{pct}), \quad (3.9)$$

e indica a quantidade de pacotes que saem do transmissor e chegam corretamente em algum receptor vizinho corretamente, por intervalo de quadro  $T_q$ . A Figura 3.3 mostra a vazão efetiva em função da taxa de geração de pacotes por estação, para  $d_r = 3$ ,  $\alpha = 3$  e para diferentes ordens de modulação. Observa-se que, para uma dada modulação, a vazão efetiva cresce linearmente com a taxa  $\lambda_m$ , indicando que todos os pacotes que entram na rede, saem corretamente. No entanto, a partir de um certo valor de  $\lambda_m$ , a vazão efetiva  $\eta$  cai rapidamente. Esta queda na vazão ocorre devido ao aumento na probabilidade de erro de pacotes  $P_{pct}$ . Conforme já discutido no capítulo anterior, a probabilidade de erro de pacote depende, dentre outros fatores, da probabilidade de ativação das estações, que, por sua vez, depende da taxa de geração de pacote  $\lambda_m$ . O aumento da taxa de geração de pacotes provoca um aumento na probabilidade de uma estação estar ativa e, conseqüentemente, no nível de interferência

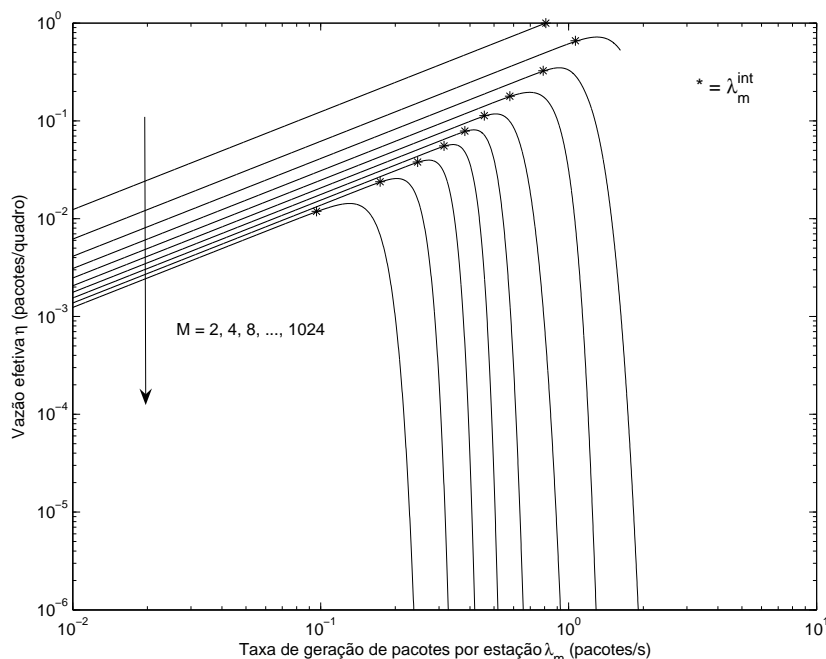


Fig. 3.4: Vazão efetiva em um enlace transmissor-receptor para  $d_r = 5$ ,  $\alpha = 3$  e diferentes ordens de modulação.

e na probabilidade  $P_{pct}$ . Portanto, ao tentar-se injetar mais pacotes na rede, o nível de interferência na rede aumenta, o que provoca uma maior perda de pacotes.

Considera-se neste estudo que a máxima taxa de erro de pacote aceitável seja  $P_{pct,max} = 1\%$ , e denota-se por  $\lambda_m^{int}$  o valor máximo de  $\lambda_m$  que resulta na probabilidade de erro de pacote máxima aceitável de  $1\%$ . Portanto, dizemos que  $\lambda_m^{int}$  é o limite da taxa de geração de pacotes *devido à interferência*. Na Figura 3.3 os valores de  $\lambda_m^{int}$  estão indicados por meio de asteriscos (\*). Nota-se que as modulações  $M = 512$  e  $M = 1024$  não atingem a probabilidade de erro de pacotes de  $1\%$  para a faixa de valores de  $\lambda_m$  considerada. Nota-se também que quanto menor o nível da modulação, maior é o valor de  $\lambda_m^{int}$ , devida à maior robustez das modulações de níveis menores.

De acordo com sua definição, a vazão efetiva  $\eta$  será sempre menor que ou igual a 1. Portanto, os resultados para  $\lambda_m^{int}$  mostrados na Figura 3.3 indicam que, para  $d_r = 3$  e  $\alpha = 3$  (além das condições indicadas na Tabela 3.1), e admitindo  $P_{pct,max} = 1\%$ , uma rede empregando modulação M-QAM para  $M = 2, 4, \dots$  será limitada pela interferência.

Se a distância  $d_r$  entre estações transmissoras concomitantes (e, portanto, interferentes) for aumentada, o nível médio de interferência cai e, conseqüentemente, a vazão efetiva aumenta, como indica a Figura 3.4, que mostra os resultados para  $d_r = 5$  e  $\alpha = 3$ . Inicialmente, observa-se que em todos os níveis de modulação analisados, a probabilidade  $P_{pct} = 1\%$  é atingida. Além disso, nota-se que, para  $M = 2$ , a vazão efetiva atinge a unidade, o que indica que o desempenho da rede nestas

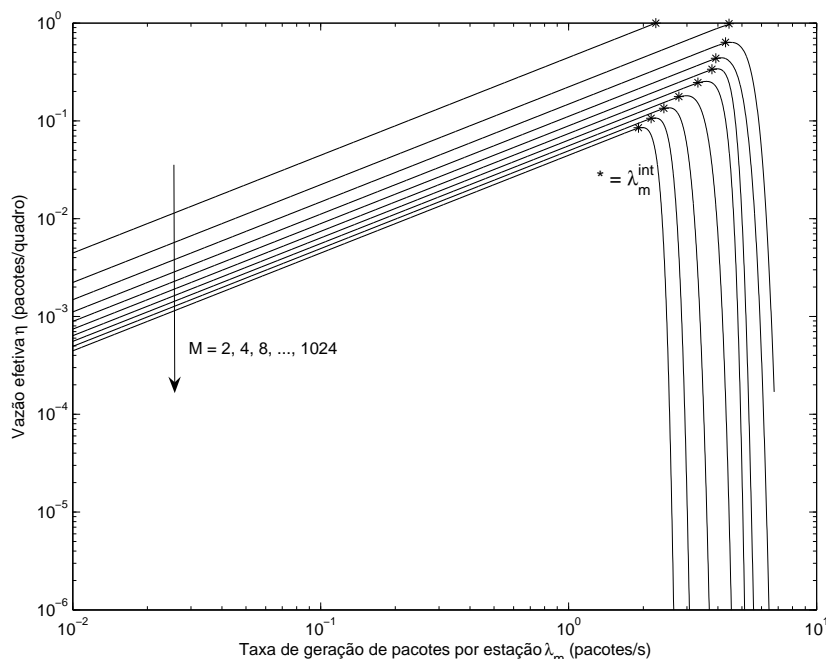


Fig. 3.5: Vazão efetiva em um enlace transmissor-receptor para  $d_r = 3$ ,  $\alpha = 5$  e diferentes ordens de modulação.

condições não é limitado pela interferência.

O aumento da vazão efetiva também é observado quando o ambiente de propagação apresenta expoente de perda de percurso  $\alpha$  maior. A Figura 3.5 mostra a vazão efetiva para  $d_r = 3$  e  $\alpha = 5$ . O aumento do expoente de perda de percurso provoca uma maior atenuação dos sinais interferentes, o que reduz a probabilidade de erro de pacote, aumentando, assim, a vazão efetiva. Os resultados da Figura 3.5 mostram que, também para  $d_r = 3$  e  $\alpha = 5$ , a rede empregando  $M = 2$  e  $M = 4$  não é limitada por interferência.

Portanto, conclui-se que a vazão efetiva aumenta com o aumento do expoente de perda de percurso ou com o aumento da distância entre transmissores concomitantes. Os resultados da vazão da rede para outras combinações de  $d_r$  e  $\alpha$  serão apresentados de forma sintetizada na próxima seção.

### 3.3 Formas de limitação do desempenho da rede

Nas seções anteriores foram identificadas duas formas de limitações de desempenho da rede: devido ao atraso, quantificada por meio da taxa  $\lambda_m^{at}$ , e devido à interferência, quantificada por meio da taxa  $\lambda_m^{int}$ . Nesta seção, estas formas de limitação serão analisadas, por meio das taxas  $\lambda_m^{at}$  e  $\lambda_m^{int}$ . Dependendo dos parâmetros e do cenário da rede, o desempenho da rede pode ser limitado pela interferência ( $\lambda_m^{at} > \lambda_m^{int}$ ), ou pelo atraso ( $\lambda_m^{at} < \lambda_m^{int}$ ). Deve-se ressaltar, no entanto, que, devido ao



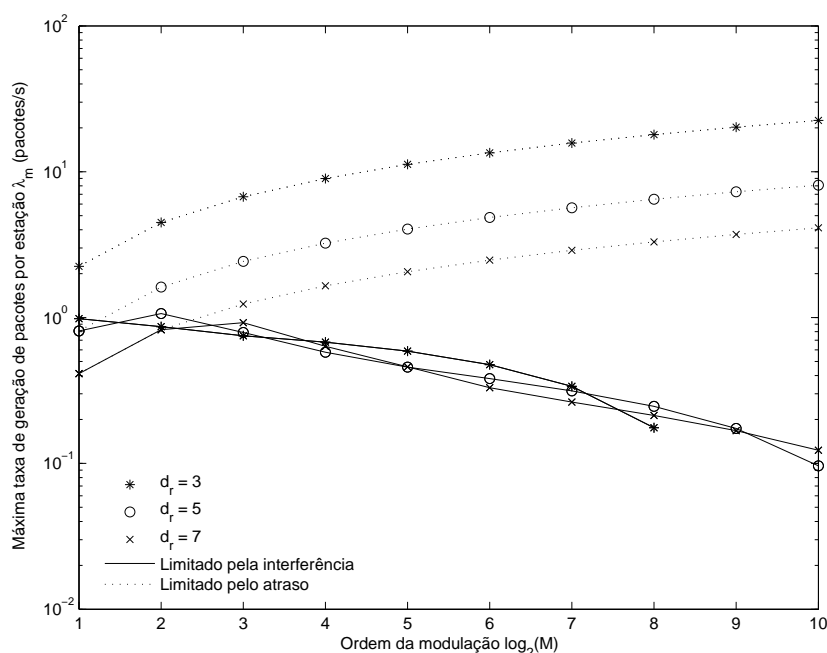


Fig. 3.6: Máximas taxas de geração de pacotes por estação limitadas pela interferência ( $\lambda_m^{int}$ ) e limitadas pelo atraso ( $\lambda_m^{at}$ ) em função da ordem da modulação, para diferentes valores de  $d_r$  e expoente de perda de percurso  $\alpha = 3$ .

fato de sempre termos  $\rho \leq 1$ , na situação de limitação por atraso teremos  $\lambda_m^{at} = \lambda_m^{int}$ .

As Figuras 3.6, 3.7, 3.8 e 3.9 mostram os valores de  $\lambda_m^{at}$  e  $\lambda_m^{int}$  em função da ordem  $M$  da modulação para diferentes distâncias  $d_r$ , e para  $\alpha = 3, 4, 5$  e  $6$ , respectivamente. A máxima probabilidade de erro de pacote aceitável usada foi  $P_{pct,max} = 1\%$ .

Iniciamos a análise pelo caso em que  $\alpha = 3$  (Figura 3.6), que pode ser considerado como um ambiente de propagação de baixa perda de percurso e, portanto, nível de interferência potencial elevado. Observa-se nesta figura que para  $d_r = 3$  a rede sempre será limitada por interferência, uma vez que, com transmissores concomitantes a esta distância entre eles, o nível de interferência é elevado. Na medida em que a distância  $d_r$  é aumentada, o desempenho da rede passa ser limitado pelo atraso para as modulações de ordem menor. É o que ocorre para  $d_r = 5$ , com  $M = 2$ , e para  $d_r = 7$ , com  $M = 2$  e  $4$ . Nestes casos indicados, a distância entre interferentes é tal que resulta em um nível de interferência suficientemente baixo que possa ser tratado pelas modulações de ordem baixa.

Quando o expoente de perda de percurso aumenta, o nível de interferência nos receptores é reduzido, fazendo com que modulações menos robustas ( $M$  maiores) também consigam tratar a interferência e manter a probabilidade de erro de pacote abaixo de  $1\%$ . Este comportamento pode ser observado na Figura 3.7, que mostra os resultados para  $\alpha = 4$ . Por exemplo, para  $d_r = 7$ , a rede é limitada pelo atraso não apenas para  $M = 2$  e  $M = 4$ , como ocorre para  $\alpha = 3$ , mas também para

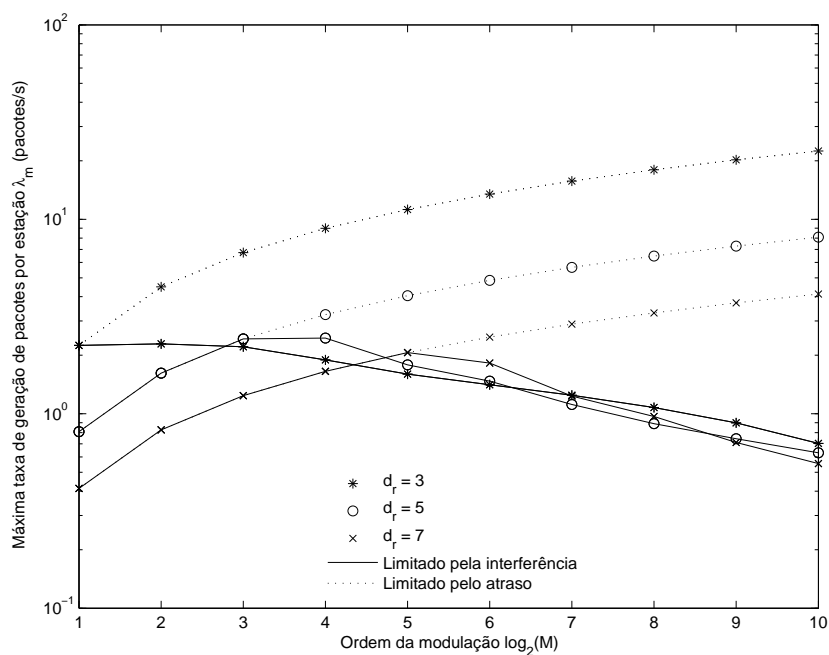


Fig. 3.7: Máximas taxas de geração de pacotes por estação limitadas pela interferência ( $\lambda_m^{int}$ ) e limitadas pelo atraso ( $\lambda_m^{at}$ ) em função da ordem da modulação, para diferentes valores de  $d_r$  e expoente de perda de percurso  $\alpha = 4$ .

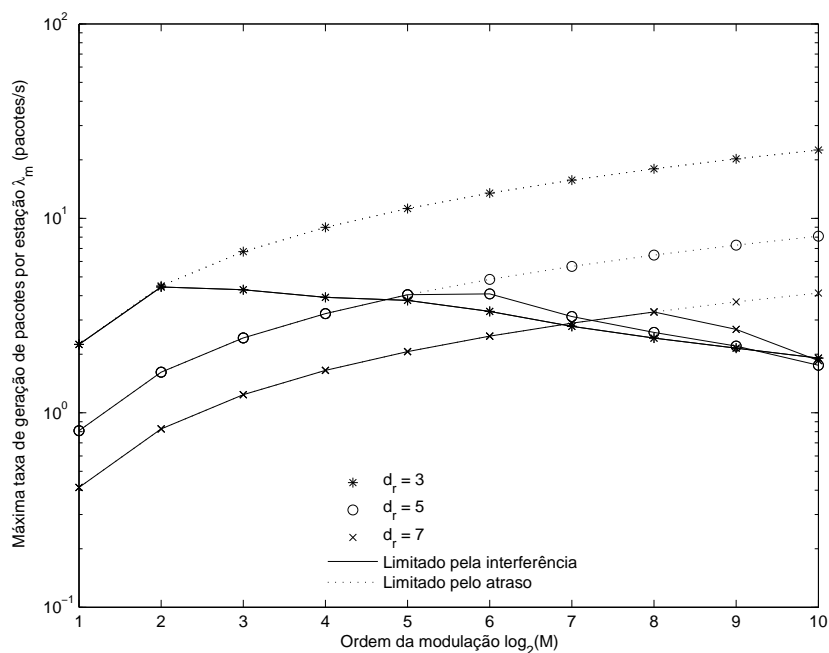


Fig. 3.8: Máximas taxas de geração de pacotes por estação limitadas pela interferência ( $\lambda_m^{int}$ ) e limitadas pelo atraso ( $\lambda_m^{at}$ ) em função da ordem da modulação, para diferentes valores de  $d_r$  e expoente de perda de percurso  $\alpha = 5$ .

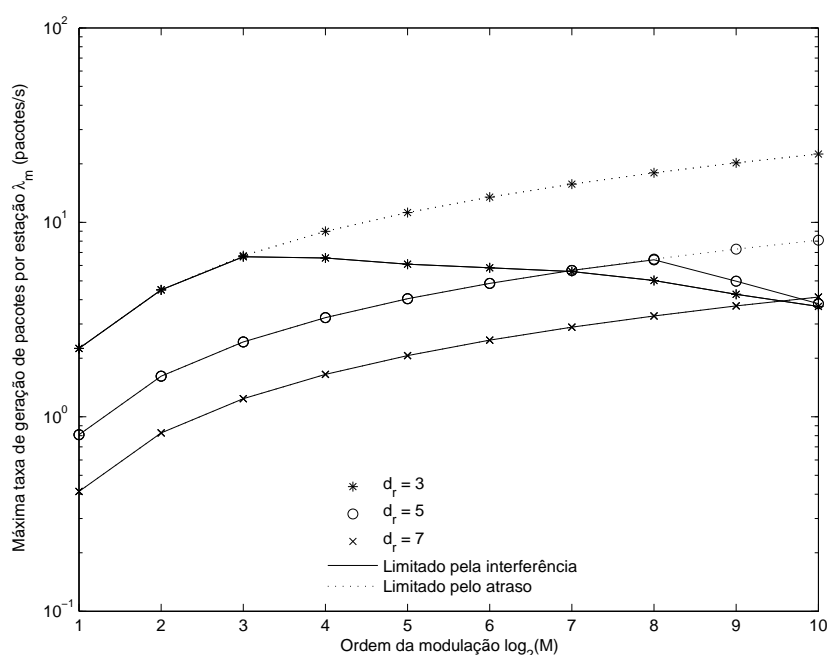


Fig. 3.9: Máximas taxas de geração de pacotes por estação limitadas pela interferência ( $\lambda_m^{int}$ ) e limitadas pelo atraso ( $\lambda_m^{at}$ ) em função da ordem da modulação, para diferentes valores de  $d_r$  e expoente de perda de percurso  $\alpha = 6$ .

$M = 8, 16$  e  $32$ .

Esta tendência de tornar a rede limitada para ordens de modulação cada vez maiores a medida que a atenuação do canal de propagação aumenta é observada para  $\alpha = 5$  (Figura 3.8) e  $\alpha = 6$  (Figura 3.9).

Os resultados das Figuras 3.6 a 3.9 também mostram que, para os casos em que a rede é limitada pela interferência, se fixados o valor do expoente de perda de percurso e a modulação, o valor de  $\lambda_m^{int}$  aproximadamente independe da distância  $d_r$ . Esta característica é facilmente observada na Figura 3.7: as curvas de  $\lambda_m^{int}$  se aproximam entre si para os casos (modulações) em que o desempenho da rede é limitado pela interferência ( $\lambda_m^{at} < \lambda_m^{int}$ ).

A Figura 3.10 mostra os mesmos resultados das Figuras 3.6 a 3.9, mas agora agrupados por valor de distância  $d_r$ . Cada gráfico mostra as curvas de máxima taxa de geração  $\lambda_m$  em função da ordem da modulação, para um dado valor de  $d_r$ . Quando a limitação da taxa de geração é devido ao atraso, o valor de  $\lambda_m$  máximo independe do expoente de perda de percurso, e cresce com o aumento da ordem da modulação. Os pontos dos gráficos neste caso estão localizados na parte superior dos gráficos, em uma curva de formato parabólico. Quando a rede passa a ser limitada pela vazão, o valor máximo de  $\lambda_m$  tende a diminuir com o aumento da ordem  $M$ , e as diferentes curvas para diferentes valores de  $\alpha$  desviam-se da curva de formato parabólico. Quanto menor for  $\alpha$  (menor atenuação e, portanto,

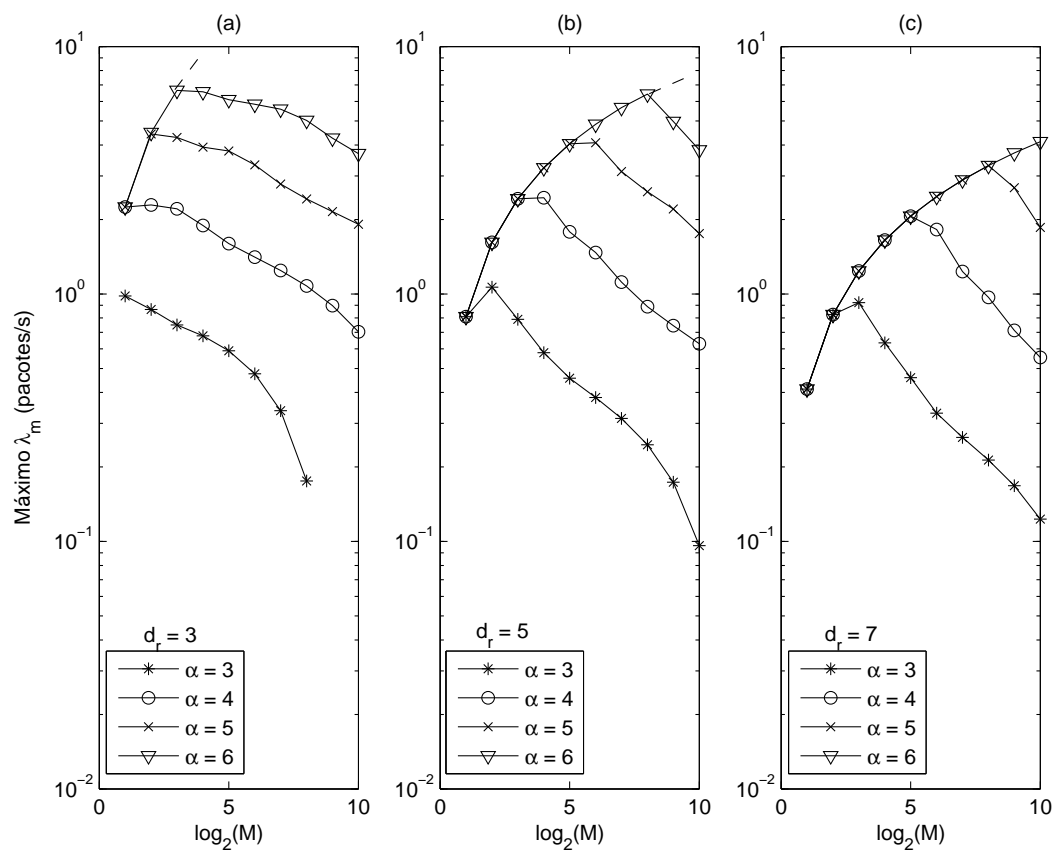


Fig. 3.10: Máximas taxas  $\lambda_m$  em função da modulação, para  $P_{pct,max} = 1\%$  e diferentes expoentes  $\alpha$ : (a)  $d_r = 3$ , (b)  $d_r = 5$  e (c)  $d_r = 7$ .

menor atenuação da interferência), menores serão os valores de  $M$  para os quais a curva se desvia da curva de limitação por atraso. Como já observado em outros gráficos, redes operando com  $d_r = 3$  e  $\alpha = 3$  são sempre limitadas por interferência, pois a curva correspondente (na Figura 3.10(a)) não tem pontos na curva de limitação por atraso. No outro extremo, redes operando com  $d_r = 7$ ,  $\alpha = 6$  e  $M \leq 1024$  são sempre limitadas pelo atraso (todos os pontos estão na curva de limitação por atraso).

### 3.4 Máxima taxa de geração de pacotes agregada

Até este ponto, a análise concentrou-se no desempenho médio de *um enlace transmissor-receptor*, sendo, portanto, a análise de interesse sob o ponto de vista do usuário da rede. Neste sentido, o valor da máxima taxa de geração de pacote, apresentada na Figura 3.10, indicava a quantidade máxima de pacotes por segundo que podem ser injetados na rede *por cada estação*, garantindo-se que a probabilidade de erro de pacote não ultrapassará 1%. Uma análise mais efetiva sobre o comportamento da rede toda seria avaliar o número *total* de pacotes que são injetados na rede em um dado momento, considerando-se todas as estações. Como a cada instante existem  $N_{at}$  enlaces ativos, a quantidade total de pacotes que podem ser injetados na rede por segundo, denotado aqui como *máxima taxa de geração de pacote agregada* da rede  $\lambda_{m,A}$ , é dada por

$$\lambda_{m,A} = \lambda_m \times N_{at}. \quad (3.10)$$

A taxa  $\lambda_{m,A}$  leva em conta o grau de reuso do canal permitido pelas condições de operação da rede (ordem da modulação  $M$ , distância entre transmissores concomitantes  $d_r$  e expoente de perda de percurso  $\alpha$ ).

Os valores de  $\lambda_{m,A}$  em função da ordem da modulação, para diferentes expoentes  $\alpha$  e distâncias  $d_r$  são mostrados na Figura 3.11. A comparação das curvas mostra que, fixado o valor da perda de percurso, o melhor desempenho da rede (ou seja, a maior taxa máxima  $\lambda_{m,A}$ ) é conseguido usando-se pequenas distâncias  $d_r$ , independentemente da ordem da modulação. Além disso, esta observação vale para qualquer valor de expoente  $\alpha$ . A distância  $d_r$  controla o grau de reuso do canal por toda rede e provoca dois efeitos opostos no desempenho da rede:

- O aumento de  $d_r$  diminui o nível de interferência nos receptores, permitindo uma maior taxa de chegada de pacotes (até que  $P_{pct}$  atinja o máximo valor aceitável), aumentando, assim, o valor de  $\lambda_{m,A}$ ;
- Por outro lado, um valor elevado de  $d_r$  corresponde a um número reduzido de estações ativas concomitantes  $N_{at}$ , reduzindo  $\lambda_{m,A}$ .

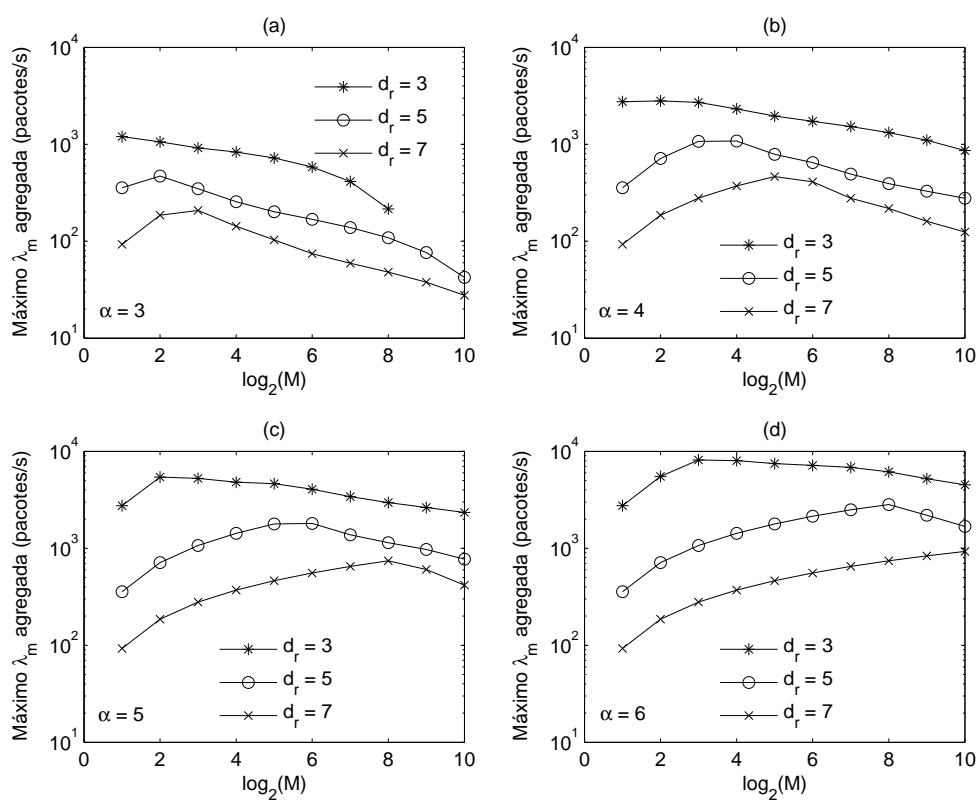


Fig. 3.11: Máxima taxa de chegada de pacote agregada  $\lambda_{m,A}$  em função da ordem da modulação para diferentes distância  $d_r$  com  $P_{pct} \leq 1\%$ : (a)  $\alpha = 3$ , (b)  $\alpha = 4$ , (c)  $\alpha = 5$  e (d)  $\alpha = 6$ .

Tab. 3.3: Ordens de modulação que resultam na maior taxa de chegada de pacotes agregada para  $P_{pct} \leq 1\%$ .

	$\alpha = 3$	$\alpha = 4$	$\alpha = 5$	$\alpha = 6$
$d_r = 3$	$M = 2$	$M = 2$	$M = 4$	$M = 8$
$d_r = 5$	$M = 4$	$M = 8$	$M = 64$	$M = 256$
$d_r = 7$	$M = 8$	$M = 32$	$M = 256$	$M = 1024$

Portanto, os resultados da Figura 3.11 mostram que o controle de  $d_r$  sob o nível da interferência é preponderante.

Considerando-se agora um valor fixo de distância  $d_r$ , os resultados da Figura 3.11 mostram que a taxa de geração de pacotes agregada pode ser maximizada pela escolha conveniente da ordem da modulação. A Tabela 3.3 mostra as ordens  $M$  que maximizam a taxa agregada  $\lambda_{m,A}$  para as diversas combinações de  $d_r$  e  $\alpha$ .

### 3.5 Atraso versus vazão efetiva

Nas Seções 3.1 e 3.2 o atraso e a vazão efetiva foram analisados separadamente, e as curvas foram apresentadas em função da taxa de chegada de pacotes por estação  $\lambda_m$ . No entanto, a análise conjunta do atraso e vazão pode ser útil na identificação e caracterização de compromissos envolvendo estas duas medidas de desempenho. Uma forma de conduzir esta análise conjunta é por meio de gráficos *atraso vs. vazão efetiva*, parametrizado por valores de  $\lambda_m$ .

A Figura 3.12 mostra curvas atraso vs. vazão efetiva para  $d_r = 3$ ,  $\alpha = 3$ , e modulações de ordem  $M = 2, 8, 128$  (as curvas correspondentes às outras ordens foram omitidas por conveniência da apresentação). Na curva correspondente à  $M = 2$  estão indicados os respectivos valores de  $\lambda_m$  de alguns pontos. Note-se que, caminhar pela curva da esquerda para a direita corresponde a aumentar o valor de  $\lambda_m$ . Portanto, tomando como exemplo o caso de  $M = 2$ , ao aumentar-se a taxa de geração de pacotes por estação, a vazão efetiva e o atraso aumentam (este último de forma menos visível). Quando a taxa  $\lambda_m$  atinge o valor 1,22 pacotes/s, a vazão efetiva atinge o seu valor máximo ( $\approx 0,5$  pacotes/quadro), e começa a diminuir (devido ao aumento da probabilidade de erro de pacote), enquanto que o atraso continua a aumentar.

Redes empregando modulações de ordens superiores começam a ter a vazão efetiva degradada para valores de  $\lambda_m$  menores. Por exemplo, para  $M = 8$ , a máxima vazão efetiva atingida é aproximadamente 0,11 pacotes/quadro, que corresponde a  $\lambda_m = 0,835$  pacotes/s.

Curvas semelhantes àsquelas apresentadas na Figura 3.12 podem ser traçadas para as outras combinações de  $d_r$  e  $\alpha$ . No entanto, sob o ponto de vista do usuário, as curvas deste gênero seriam mais

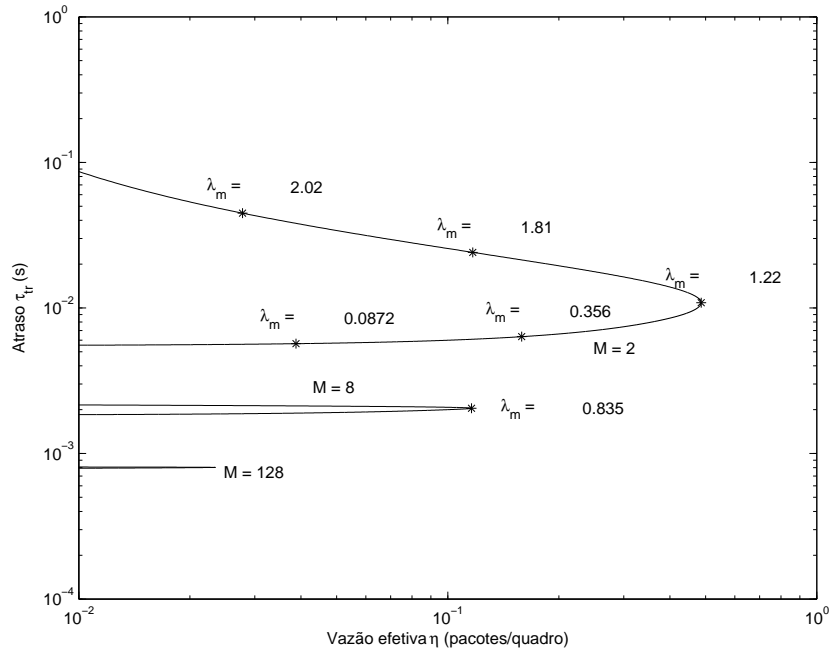


Fig. 3.12: Atraso  $\bar{\tau}_{tr}$  versus vazão efetiva para  $d_r = 3$ ,  $\alpha = 3$  e diferentes modulações. Números próximos aos asteriscos indicam o valor correspondente da taxa de geração de pacotes  $\lambda_m$ .

úteis se indicassem o compromisso entre atraso e a vazão efetiva *por estação*, e expressa em termos de pacotes por segundo. A vazão efetiva por estação, em termos de pacotes/s, pode ser calculada lembrando que a vazão  $\eta$  é uma medida de pacotes por quadro que trafegam em um enlace. Para convertermos esta medida para pacotes/s, basta dividirmos  $\eta$  pela duração do quadro. Além disso,  $\eta$  considera também os pacotes dos enlaces que passam pela estação. Portanto, considerando apenas os pacotes gerados pela estação e medindo a vazão em termo de pacotes/s, então a vazão efetiva por estação, denotada por  $\eta_{est}$  é calculada como:

$$\eta_{est} = \eta \times \frac{1}{\frac{\bar{n}_r}{N-1} + 1} \times \frac{1}{\frac{N}{N_{at}} \frac{L_m}{B \log_2 M}} \tag{3.11}$$

$$= \lambda_m (1 - P_{pct}). \tag{3.12}$$

Portanto, o compromisso entre atraso e vazão serão analisados por meios das curvas atraso  $\bar{\tau}_{tr}$  vs. vazão efetiva por estação  $\eta_{est}$ .

A Figura 3.13 mostra as curvas atraso vs. vazão efetiva por estação para  $d_r = 3$  e  $\alpha = 3$ . Apenas os resultados de algumas ordens de modulações  $M$  são mostrados nesta figura, por conveniência de apresentação. Como anteriormente, a Figura 3.13 mostra os respectivos valores de  $\lambda_m$  para alguns pontos da curva correspondente a  $M = 2$ . Note que para valores baixos de  $\lambda_m$ , temos  $\eta_{est} \approx \lambda_m$ , devido ao baixo valor da probabilidade de erro.



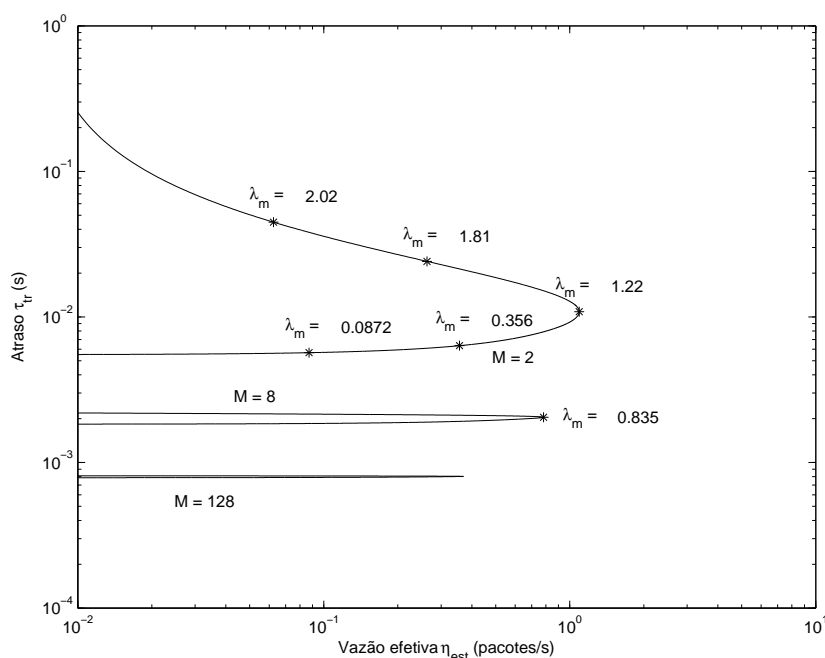


Fig. 3.13: Atraso  $\bar{\tau}_{tr}$  versus vazão efetiva para diferentes modulações, para  $d_r = 3$  e  $\alpha = 3$ .

As curvas na Figura 3.13 indicam que modulações de ordens superiores resultam em atrasos menores. Este comportamento do atraso com relação à ordem da modulação (ou seja, quanto maior for  $M$ , menor será  $\bar{\tau}_{tr}$ ) independe da taxa  $\lambda_m$ , da distância  $d_r$  e do expoente  $\alpha$ , como já foi observado nas figuras anteriores.

Por outro lado, o comportamento da vazão efetiva máxima com relação à ordem da modulação depende da distância  $d_r$  e de expoente  $\alpha$ . Por exemplo, para o caso  $d_r = 3$  e  $\alpha = 3$ , mostrado na Figura 3.13, a vazão efetiva máxima diminui com o aumento do ordem  $M$ . Isto ocorre por que, para  $d_r = 3$  e  $\alpha = 3$ , a rede é limitada por interferência, como já discutido. Se a distância entre transmissores concomitantes for aumentada para  $d_r = 7$  e o canal de propagação apresentar um expoente de perda de percurso  $\alpha = 6$ , o desempenho da rede não será mais limitado por interferência, e a vazão máxima aumentará com a ordem da modulação, com indica a Figura 3.14. Deve-se ressaltar que mesmo para condições de transmissão favoráveis (isto é, distância  $d_r$  grande e expoente de perda de percurso alto), a vazão efetiva por estação cairá a partir de um certo valor de taxa de geração de pacote, devido ao eventual aumento da interferência. No entanto, neste ponto, o atraso já será muito elevado.

Com base no comportamento do atraso e da vazão efetiva por estação, pode-se implementar um esquema de transmissão adaptativo, em que a ordem da modulação é ajustada com o objetivo de obter a máxima vazão, às custas de um aumento no atraso. As curvas mostradas nas Figuras 3.13 indicam que para valores de  $\lambda_m$  baixos, a modulação de maior nível (no caso em estudo,  $M = 1024$ ) resulta no

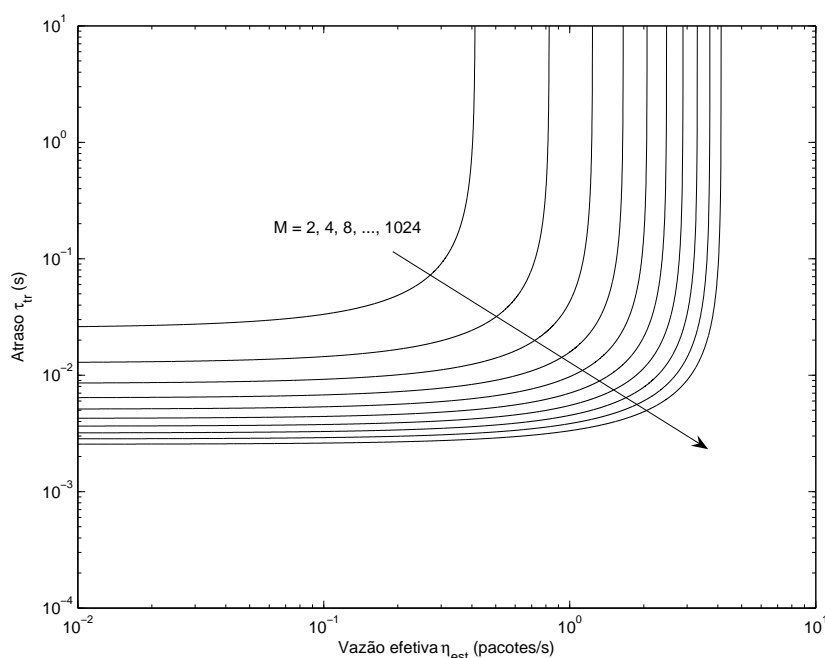


Fig. 3.14: Atraso  $\bar{\tau}_{tr}$  versus vazão efetiva para diferentes modulações, para  $d_r = 7$  e  $\alpha = 6$ .

melhor desempenho: o atraso é o menor e a vazão não foi ainda degradada pela perda de pacotes. Ao aumentar-se a taxa de geração de pacotes, chegar-se-á a um ponto em que a vazão efetiva começa a cair. Neste ponto, o esquema de transmissão adaptativo diminuiria o nível da modulação, tornando-a mais robusta, às custas de um aumento no atraso.

Uma rede operando com um sistema de transmissão adaptativo, como descrito acima, apresentaria uma curva atraso vs. vazão efetiva por estação formada por trechos das curvas das diversas modulações envolvidas, de tal forma a maximizar a vazão efetiva. A Figura 3.15 mostra esta curva, denominada aqui “envelope”, para  $d_r = 3$  e  $\alpha = 3$ .

Curvas envelopes para  $\alpha = 3$  e diferentes valores de  $d_r$  são mostradas na Figura 3.16. Inicialmente, observa-se que para baixos valores de  $\lambda_m$ , menores atrasos são obtidos com  $d_r$  menores, devido à menor duração do quadro TDMA. Com o aumento de  $\lambda_m$ , a vazão da rede empregando  $d_r = 3$  cai rapidamente, devido ao elevado nível de interferência. Por outro lado, os envelopes para  $d_r = 5$  e  $d_r = 7$  indicam uma menor degradação da vazão com o aumento de  $\lambda_m$ .

A Figura 3.16 traz também as curvas atraso vs. vazão efetiva por estação para  $M = 2$  e  $M = 4$  com  $d_r = 7$ . Note que a curva envelope para  $d_r = 7$  não contém trechos das curvas correspondentes a  $M = 2$  e  $M = 4$ . Para compreender por que isso ocorre, examina-se a vazão efetiva  $\eta_{est}$  e o atraso  $\bar{\tau}_{tr}$  em função da taxa de geração de pacotes  $\lambda_m$ , mostrados na Figura 3.17 (as curvas para  $M \geq 32$  foram omitidas para clareza na apresentação). Comparando-se o comportamento das curvas de atraso e vazão efetiva quando o valor de  $\lambda_m$  aumenta, observa-se que para  $M = 2$  e  $M = 4$  o

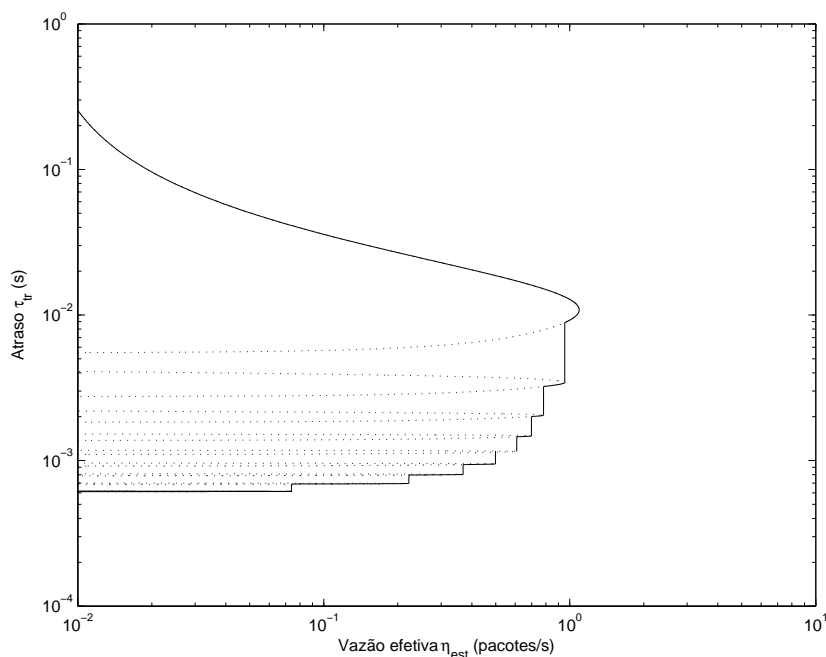


Fig. 3.15: Envelope das curvas atraso  $\bar{\tau}_{tr}$  vs. vazão efetiva por estação, para  $d_r = 3$  e  $\alpha = 3$ . As linhas tracejadas representam as curvas para as diferentes modulações.

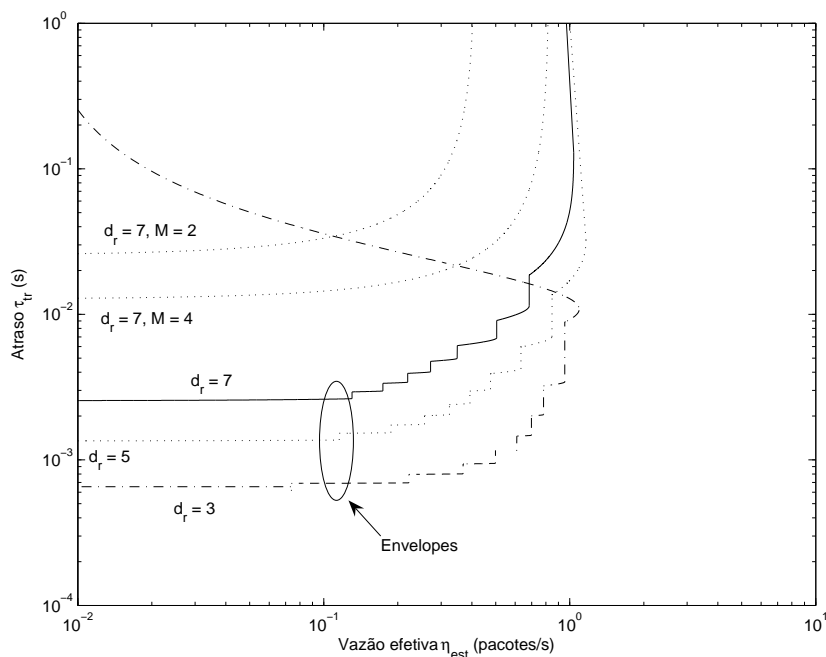


Fig. 3.16: Envelope para  $\alpha = 3$  e diferentes distâncias  $d_r$ . Curvas individuais para  $d_r = 7$ , com  $M = 2$  e 4 são também mostradas.

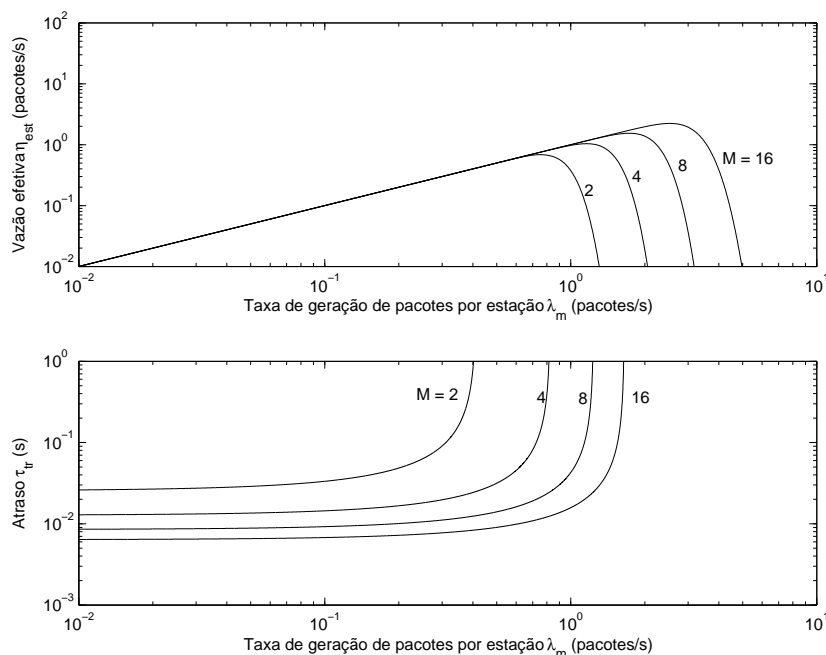


Fig. 3.17: Vazão efetiva  $\eta_{est}$  e atraso  $\bar{r}_{tr}$  em função da taxa de chegada de pacotes  $\lambda_m$  para  $d_r = 7$  e  $\alpha = 3$ . Os números próximos às curvas indicam a ordem da modulação correspondente.

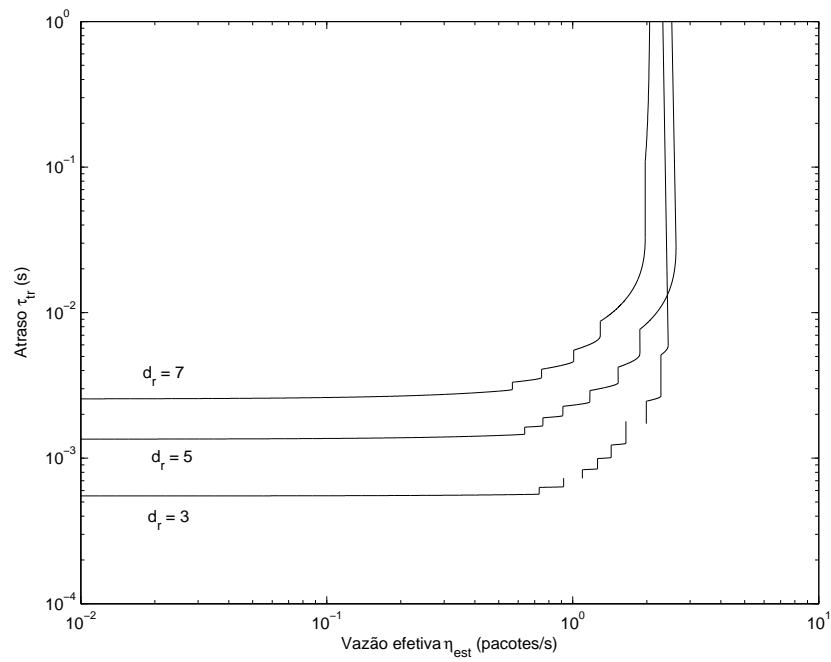
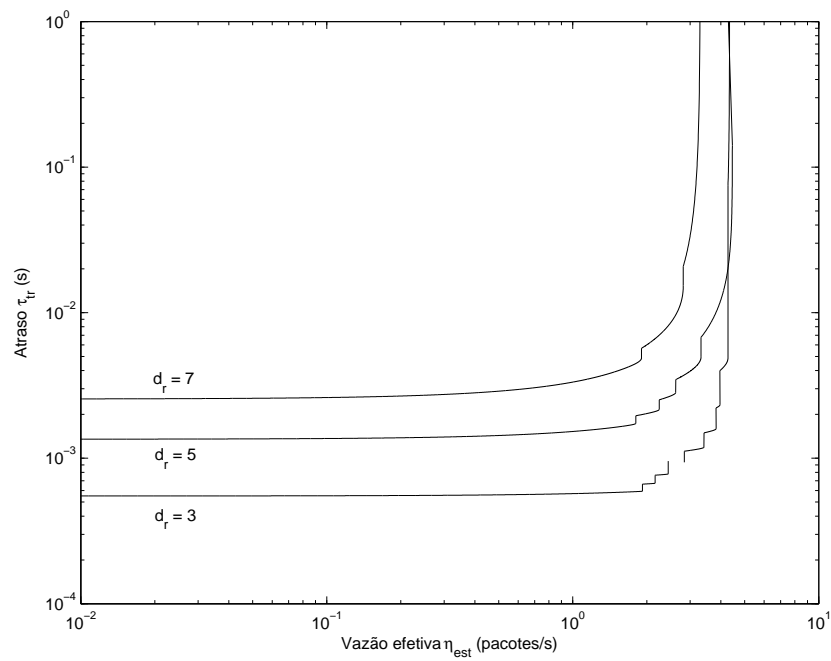
valor do atraso explode (ou seja, tende a infinito) antes da vazão cair. Este resultado concorda com aquele apresentado na Figura 3.6. Naquela figura, a curva correspondente a  $d_r = 7$  mostra que a rede operando com modulações  $M = 2$  e  $M = 4$  é limitada pelo atraso, ou seja, a degradação devido à perda de pacotes ocorrerá para valores de  $\lambda_m$  maiores. Portanto, retornando à Figura 3.16, o nível de modulação  $M = 8$  é o menor que resulta em atraso finito.

As Figuras 3.18, 3.19 e 3.20 mostram as curvas envelopes para  $\alpha = 4$ ,  $\alpha = 5$  e  $\alpha = 6$ , respectivamente. Observa-se que com o aumento do expoente de perda de percurso, o desempenho da rede passa a ser limitado pelo atraso, como já discutido anteriormente.

## 3.6 Conclusões

Este capítulo apresentou uma análise do desempenho de uma rede ad hoc com múltiplos saltos, com base na formulação derivada no Capítulo 2. A análise investigou a influência dos diversos parâmetros da rede na vazão e no atraso. As principais conclusões desta análise podem ser assim resumidas:

- Foram identificadas duas formas de limitações de desempenho da rede: devido ao atraso, quando os pacotes observam atraso infinito, e devido à interferência, quando os pacotes são recebidos com uma probabilidade de erro superior à máxima aceitável. A rede operará em uma

Fig. 3.18: Envelope para  $\alpha = 4$  e diferentes distâncias  $d_r$ .Fig. 3.19: Envelope para  $\alpha = 5$  e diferentes distâncias  $d_r$ .

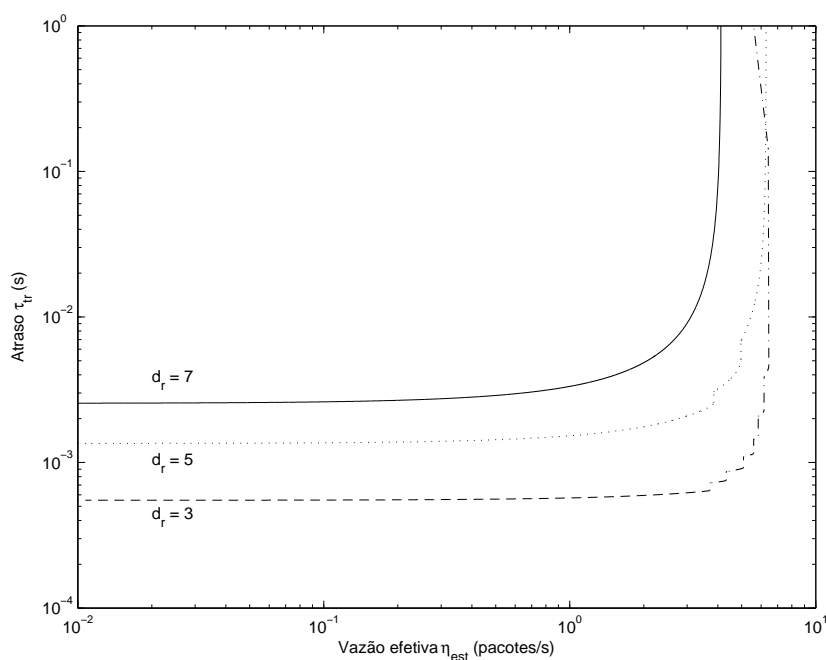


Fig. 3.20: Envelope para  $\alpha = 6$  e diferentes distâncias  $d_r$ .

ou outra situação dependendo da combinação entre o nível de interferência e a robustez do esquema de modulação. Por exemplo, a rede será limitada pela interferência para um ambiente com perda de propagação pequena ( $\alpha$  pequeno) e para distâncias de reuso  $d_r$  pequenas.

- Foi observado que, quando se está interessado em maximizar a quantidade total de pacotes que trafegam na rede (garantida a probabilidade de erro de pacote inferior à máxima aceitável), os melhores resultados são obtidos com  $d_r$  pequenos, pois haverá um maior número de enlaces ativos simultaneamente, independentemente da forma de limitação na qual rede opera.
- Por fim, mostrou-se a possibilidade de operar a rede usando um esquema de transmissão adaptativo, que altera o nível de modulação com o objetivo maximizar a vazão, às custas de um aumento no atraso.

# Capítulo 4

## Conclusões

As características intrínsecas de uma rede ad hoc sem fio de múltiplos saltos, tais como a ausência de uma entidade controladora central e de infra-estrutura, a possibilidade de comunicação direta entre as estações, além da degradação imposta pelo canal sem fio, impõem desafios à análise do desempenho de tais redes. Tais desafios são ainda maiores quando se deseja empregar uma formulação analítica para a análise. Não obstante, diversos modelos analíticos para a rede podem ser encontrados na literatura.

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de um modelo analítico para o desempenho de uma rede ad hoc sem fio, estendendo modelos encontrados na literatura. Com base neste modelo, foi apresentada a análise de uma rede, avaliando como o atraso e a vazão são afetados por diversos parâmetros da rede, como a atenuação do sinal no canal de propagação, o grau de reuso de do canal na rede e a robustez do sistema de transmissão.

As principais características do modelo analítico da rede são assim resumidas:

- A rede apresenta uma estrutura toroidal, de forma a tornar o comportamento das estações invariante com suas posições. As posições das estações seguem uma grade de formato triangular;
- O modelo de canal inclui apenas a perda determinística por percurso;
- A rede opera com canal único, com controle de acesso por meio da técnica TDMA, e com reuso de canal (*time-slots*) espacial;
- Para a derivação do atraso dos pacotes é usado o *Princípio da Independência*, de forma que a rede é modelada com um conjunto de filas do tipo M/D/1;
- Cada estação transmite pacotes gerados localmente e pacotes de outras estações devido aos enlaces fonte-destino;

- O grau de uso de canal é quantificado pela distância entre estações ativas simultaneamente  $d_r$ ;
- Na modelagem da interferência na cálculo da  $SIR$ , é levado em conta o grau de atividade das estações, modelado por meio da probabilidade  $p_{at}$  de haver pacotes na fila da estação;
- A transmissão emprega modulação M-QAM.

Com base neste modelo para a rede, foram extraídas expressões analíticas para o atraso de pacote em um enlace transmissor-receptor e para a vazão efetiva, que leva em conta apenas os pacotes recebidos corretamente.

A análise do atraso e da vazão em função da taxa de chegada de pacotes por estação e das características da rede mostraram que a vazão efetiva pode ser limitada pela atraso (quando este tende a infinito) ou pela interferência (quando a taxa de erro de pacotes excede o valor máximo aceitável). A operação da rede em uma ou outra situação dependerá do controle do nível da interferência e da robustez da modulação frente à interferência.

Considerando a quantidade total de pacotes trafegando pela rede, ou seja, a soma das máximas taxas de chegada nas situações de limite, observou-se que a máxima capacidade é obtida com pequenas distâncias de reuso  $d_r$ , independentemente da forma de limitação da vazão.

Por fim, foi apresentada uma análise da rede por meio das curvas de compromisso entre atraso e vazão efetiva por estação (as curvas envelope). A partir desta análise, foi mostrada a possibilidade da rede operar com um esquema de modulação adaptativo. Tal esquema diminui a ordem de modulação (tornando-a mais robusta e controlando a perda de pacotes) a medida que a taxa de chegada de pacotes aumenta, provocando o aumento do nível de interferência. Este controle da vazão ocorre, no entanto, às custas de um aumento no atraso.

## 4.1 Trabalhos futuros

A seguir são apresentadas algumas questões identificadas para a continuação deste trabalho:

1. Inclusão de outros efeitos do canal de propagação no modelo do canal, como o desvanecimento de longo prazo, utilizando a distribuição lognormal, e o desvanecimento de curto prazo, utilizando as distribuições de Rayleigh, Hoyt, Rice ou Nakagami- $m$ ;
2. Considerar o uso de antenas diretivas nas estações como forma de controlar a interferência;
3. Considerar o uso de esquema de retransmissão de pacotes recebidos com erro. Tais esquemas podem afetar o compromisso entre a vazão e o atraso;



4. No modelo de tráfego apresentado, foi suposto que cada estação estabelece enlace F-D com todas as outras estações. Uma situação mais realista é aquela em que uma estação se comunica com apenas uma parcela das outras estações que, tipicamente, estão na sua vizinhança. Esta nova situação altera o cálculo do número de enlaces F-D passando por uma estação e pode provocar alterações no comportamento da rede;
5. Avaliar o impacto da distância de separação entre transmissor e receptor, que neste trabalho foi mantida constante. O aumento desta distância diminuirá o número de saltos entre a fonte e o destino, o que tende a diminuir a quantidade de pacotes trafegando na rede. Por outro lado, o maior alcance de transmissão aumenta o nível de interferência, aparecendo, assim, um compromisso que deve ser investigado;
6. Utilizar a eficiência de informação agregada da rede como medida de desempenho, que analisa o compromisso entre probabilidade de erro de pacote, retransmissão de pacotes e eficiência do sistema de transmissão.

# Referências Bibliográficas

- [1] C. S. R. Murthy and B. Manoj, *Ad Hoc Wireless Networks Architectures and Protocols*, I. Pearson Education, Ed. Prentice Hall Profesional Technical Reference, 2004.
- [2] H. Takagi and L. Kleinrock, “Optimal transmission ranges for randomly distributed packet radio terminals,” *IEEE Transactions Communication*, vol. 32, pp. 257–264, Março 1984.
- [3] M. Subbarao and B. L. Hughes, “Optimal transmission ranges and rodes rates for a frequency-hop packet radio networks,” *IEEE Transactions Communication*, vol. 48, pp. 670–678, Abril 2000.
- [4] P. Gupta and P. R. Kumar, “The capacity of wireless networks,” *IEEE Transactions On Information Theory*, vol. 46, no. 2, pp. 388–404, March 2000.
- [5] R. Nelson and L. Kleinrock, “Spatial tdma: A collision free multihop channel access protocol,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. COM-33, no. 9, pp. 934–944, September 1985.
- [6] J. Gronkvist, “Assignment strategies for spatial reuse tdma,” Master’s thesis, Royal Institute of Technology, Mars 2002.
- [7] B. Shrader, M. Sanchez, and T. Giles, “Throughput-delay analysis of conflict-free scheduling in multihop ad-hoc networks.”
- [8] L. Kleinrock, *Queueing Systems Volume II: Computer Applications*, Wiley-Intersciency, Ed. New York, 1976.
- [9] S. Panichpapiboon, G. Ferrari, N. Wisitpongphan, and O. K. Tonguz, “Pros and cons of route reservation in static multi-hop networks,” *IEEE*, pp. 3000 – 3004, 2005.
- [10] M. D. Yacoub, *Wireless tecnologia: protocols, standards, and techniques*,. CRC Press, 2001.