

Leonardo Barbosa e Oliveira

Avaliação de Estratégias de Roteamento Ad hoc e Técnicas
Par-a-Par de Localização de Conteúdo em redes Par-a-Par sobre
Redes Móveis Ad hoc

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Curso de Pós-Graduação em Ciência da
Computação da Universidade Federal de Mi-
nas Gerais, como requisito parcial para a
obtenção do grau de Mestre em Ciência da
Computação.

Belo Horizonte

17 de Março de 2005



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

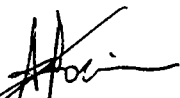


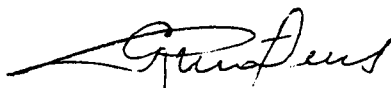
FOLHA DE APROVAÇÃO

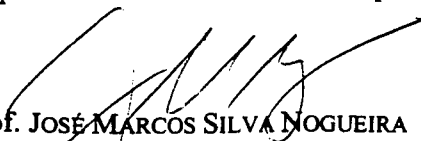
Avaliação de Estratégias de Roteamento AD HOC e Técnicas PAR-A-PAR de
Localização de Conteúdo em Redes PAR-A-PAR Sobre Redes Móveis AD
HOC


LEONARDO BARBOSA E OLIVEIRA

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:


Prof. ANTONIO ALFREDO FERREIRA LOUREIRO - Orientador
Departamento de Ciência da Computação - UFMG


Prof. GERALDO ROBSON MATEUS
Departamento de Ciência da Computação - UFMG


Prof. JOSÉ MÁRCOS SILVA NOGUEIRA
Departamento de Ciência da Computação - UFMG


DRA. WONG HAO CHI
Departamento de Ciência da Computação - UFMG

Belo Horizonte, 11 de fevereiro de 2005.

Verso apresentado por mim na segunda série do primário.

Resumo

Ambas as Redes Móveis *Ad hoc* (MANETs) e as Redes Par-a-Par (P2P) são auto-organizáveis, de natureza descentralizada e responsáveis por rotear requisições em ambientes distribuídos de topologia dinâmica. Enquanto MANETs são compostas de dispositivos com poucos recursos e, portanto, suscetíveis a falhas, as redes P2P são conhecidas pela sua tolerância a falhas. Desta forma, sustentamos que MANETs e redes P2P não são apenas similares, mas também complementares. Em outras palavras, defendemos a idéia de que o sistema P2P é o ideal para se compartilhar arquivos em MANETs. Este trabalho aborda a integração dessas duas redes do ponto de vista de roteamento e localização de conteúdo. Para tal, estudamos: 1) o desempenho dos protocolos de roteamento *ad hoc* DSR, DSDV e AODV sob uma rede P2P Gnutella; e 2) o desempenho dos protocolos P2P de localização de conteúdo Chord e Gnutella sobre uma MANET cujo roteamento foi efetuado pelo protocolo AODV. Utilizamos simulação para efetuar os estudos sob diversos cenários e os resultados indicam que a escolha da estratégia a empregar, seja ela *ad hoc* ou P2P, dependerá da aplicação e do ambiente em que será utilizada.

Abstract

Both Mobile *Ad Hoc* Networks (MANETs) and Peer-to-Peer (P2P) networks are decentralized and self-organizing networks with dynamic topology and responsible for routing queries in a distributed environment. Because MANETs are composed of resource-constrained devices susceptible to faults, whereas P2P networks are fault-tolerant, we argue that P2P networks are the ideal data sharing system for MANETs. This work deals with the integration of these networks in terms of routing and content discovery. To this end, we conducted the following studies: 1) a performance evaluation of the DSR, DSDV, and AODV *ad hoc* protocols under a Gnutella P2P network; and 2) a performance evaluation of the Chord and Gnutella P2P content discovery protocols over a MANET at which AODV played the role of routing protocol. We made use of simulation to carry out the studies under various scenarios and results indicated the importance of identifying precisely characteristics of the environment in question before committing to particular *ad hoc* or P2P protocols.

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus pela dádiva de viver.

Mãe, Pai, obrigado por me proporcionarem tudo do bom e do melhor. Seja no campo afetivo – amor, carinho e amizade –, seja no campo cultural – educação, livros e Internet de banda larga. Gostaria de deixar claro que este meu passo de vanguarda foi graças ao salto que vocês deram, fazendo com que eu já começasse na frente. Mãe, sabemos que optou por nós e somos gratos por isso. Pai, maior que a minha obediência ao senhor, só mesmo a minha proteção. Lembrem-se disso! Amo vocês!

À minha amada Ana, pelas diversas vezes que me carregou no colo e por me fazer feliz.

À minha família e amigos. JUs, Io, Si, Amanda, Rogério, DCC, TKD e outros, muito obrigado.

Um obrigado especial às pessoas que me orientaram, na academia e na vida, durante o curso de mestrado. O professor Loureiro, talvez a pessoa mais íntegra que já encontrei, é um visionário cuja percepção transcende os horizontes, e serei sempre grato às formas com que me recebeu e guiou. A professora Chi domina a arte de pesquisar (ética, princípios, conteúdo e metodologia) como ninguém e contribuiu extraordinariamente para minha formação. É notável seu comprometimento profissional, seja como professora, seja como orientadora. Nossa amizade já deixa saudades em meu coração. O professor José Marcos, estereótipo do mineiro – boa praça, paciente, amigável, confiável, justo e honesto – é referência de sucesso na vida. Muitas vezes não temos consciência da importância dos trevos com os quais nos deparamos durante a vida. Foi o José Marcos que desbravou o caminho que escolhi em um desses trevos. Professores, saibam que serei sempre grato e leal a vocês.

Gostaria de agradecer à Isabela, Daniel e Habib, que me apoiaram nas contribuições científicas presentes na dissertação e ao Ademir, pelo suporte nas disciplinas. Camara, obrigado pelas orientações. Celina e Gustavo obrigado pela força.

Agradeço os órgãos de fomento, CNPq e CAPES, pela minha bolsa, a qual me possibilitou dedicação integral à pesquisa.

Finalmente, gostaria demonstrar a minha gratidão à Universidade Federal de Minas Gerais pelo privilégio de ter sido aluno da instituição.

Conteúdo

Lista de Figuras	vi
Lista de Tabelas	viii
1 Introdução	1
1.1 Introdução	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Contribuições	2
1.4 Organização	6
2 Conceitos	7
2.1 MANETs	7
2.1.1 Roteamento em MANETs	7
2.2 Redes P2P	9
2.2.1 Localização de Conteúdo em Redes P2P	9
2.3 Comparação entre MANETs e Redes P2P	11
3 Trabalhos Relacionados	13
4 Modelo de Rede e Implementação de Protocolos	16
4.1 Modelo de Rede	16
4.2 Descrição dos Protocolos P2P Implementados	17
5 Avaliação de Roteamento em MANETs sob Redes P2P	19
5.1 Simulação	19
5.2 Métricas	20
5.3 Carga da Rede	20
5.4 Mobilidade	22
5.5 Densidade da Rede	24

5.6	Densidade de Peers	26
6	Avaliação de Localização de Conteúdo em Redes P2P sobre MANETs	28
6.1	Simulação	28
6.2	Métricas	29
6.3	Carga da Rede	29
6.4	Tamanho da Rede	32
6.5	Erro do Canal	34
6.6	Mobilidade	37
6.7	Dinâmica da Rede	40
7	Discussão dos Resultados	43
7.1	Elaboração de protocolos para Redes P2P sobre MANETs	44
8	Conclusões e Trabalhos Futuros	46
	Apêndice	47
	A Número Máximo de Vizinhos Gnutella	48
	Bibliografia	50

Lista de Figuras

5.1	Variação do número de requisições por <i>peer</i>	21
5.2	Variação do tamanho de arquivos	22
5.3	Variação do tempo de repouso	23
5.4	Variação de velocidade	23
5.5	Variação do número de nós	24
5.6	Variação do número de nós e do raio de alcance	25
5.7	Variação do número de <i>peers</i>	27
6.1	Taxa de <i>hit</i>	30
6.2	Atraso	30
6.3	Número de mensagens enviadas	31
6.4	Energia por <i>hit</i>	31
6.5	Taxa de <i>hit</i>	32
6.6	Atraso	32
6.7	Número de mensagens enviadas	33
6.8	Energia por <i>hit</i>	33
6.9	Taxa de <i>hit</i>	34
6.10	Atraso	35
6.11	Número de mensagens enviadas	35
6.12	Energia por <i>hit</i>	36
6.13	Energia consumida pela rede	36
6.14	Taxa de <i>hit</i>	37
6.15	Atraso	37
6.16	Número de mensagens enviadas	38
6.17	Energia por <i>hit</i>	38
6.18	Energia consumida pela rede	39
6.19	Número total de mensagens descartadas durante a simulação	39

6.20	Atraso	40
6.21	Número de mensagens enviadas	41
6.22	Energia por <i>hit</i>	41
6.23	Taxa de <i>hit</i>	42
A.1	Variação do número de vizinhos	49

Lista de Tabelas

2.1	Diferenças entre MANETs e redes P2P	12
4.1	Tipos de mensagens de uma rede P2P Gnutella	18

Capítulo 1

Introdução

1.1 Introdução

O advento da computação móvel e o avanço da Internet nos últimos anos possibilitaram novas tecnologias e quebra de paradigmas. Dentre tais tecnologias duas chamam especial atenção pela gama de aplicações que oferecem e pela facilidade de serem colocadas em operação. São elas Redes Móveis *Ad hoc* (MANETs – *Mobile Ad hoc Networks*) e Redes Par-a-Par (P2P – *Peer-to-Peer*).

Por não serem dependentes de prévia infra-estrutura, MANETs possibilitam aplicações de resgate em situações de desastres e troca de informações em campos de batalha [1, 2, 3, 4].

Já as redes P2P são uma alternativa às redes baseadas no modelo cliente/servidor e representam uma solução eficiente para compartilhamento de dados e processamento de informação em ambientes distribuídos [3, 5] – razão pela qual foram amplamente adotadas na Internet.

O sucesso em prover soluções deve-se às semelhanças entre MANETs e redes P2P. Ambas são descentralizadas, auto-organizáveis e são responsáveis por rotear requisições em ambientes distribuídos de topologia dinâmica. Além disso, em cada uma delas, integrantes da rede possuem características e funcionalidades equivalentes e podem enviar e responder requisições uns aos outros.

Nós vamos além e sustentamos que MANETs e redes P2P não são apenas similares, mas também complementares. Devido ao fato dos dispositivos nas redes *ad hoc* geralmente possuírem baixo poder computacional e, por conseguinte, serem incapazes de agir como servidores todo o tempo (ou mesmo atender vários clientes ao mesmo tempo), aplicações P2P prometem ser uma poderosa ferramenta para disseminar informação em MANETs. Além disso, esperamos que algumas aplicações viabilizadas pelas MANETs necessitem que os dispositivos *ad*

hoc trabalhem em cooperação com os demais. Para ilustrar, imagine-se a comunicação entre membros de um grupo de resgate. Um integrante do grupo pode requerer a localização do vizinho (outro integrante) mais próximo. É verdade que em uma rede baseada no paradigma cliente/servidor um dispositivo central pode ser responsável por armazenar essa informação. No entanto, tal abordagem seria não apenas mais cara (isso acarretaria mais *hops* e constantes atualizações de localização), mas também menos robusta – note-se que um único ponto de falha não é desejável em situações de resgate e servidores seriam alvo de ataques em campos de batalha.

1.2 Objetivos

Embora existam muitos trabalhos de avaliação de desempenho de roteamento em MANETs ([6, 7, 8, 9], por exemplo) e outros de avaliação de desempenho de localização de conteúdo em redes P2P ([10, 11, 12, 13], por exemplo), como iremos ver no Capítulo 3, poucos são os trabalhos que focam o desempenho desses protocolos em redes P2P sobre MANETs. Portanto, o objetivo deste trabalho era avaliar quais estratégias de roteamento em MANETs e de localização de conteúdo em redes P2P seriam mais interessantes para ambientes em que esses sistemas coexistissem, isto é, em que redes P2P seriam executadas sobre MANETs.

Mais exatamente, avaliamos o desempenho dos protocolos de roteamento *ad hoc* DSR [14], DSDV [15], AODV [16], sob uma rede P2P Gnutella; e o desempenho dos protocolos P2P de localização de conteúdo Chord [17], e Gnutella sobre uma MANET cujo roteamento era exercido pelo protocolo AODV.

1.3 Contribuições

Apenas recentemente a comunidade de pesquisa atentou para a semelhança e sinergia entre MANETs e redes P2P. Além disso, na época em que o trabalho foi iniciado, até onde sabíamos, não havia nenhum trabalho de avaliação de um sistema que integrasse MANETs e redes P2P. Mesmo hoje, os trabalhos que focam a integração destes sistemas, não apresentam avaliações em que foram utilizados protocolos consolidados de MANETs (DSR, DSDV, AODV, TORA [18], ZRP [19], etc.) e/ou de redes P2P (Chord, Gnutella, Past [20], Pastry [21], CAN [22], Tapestry [23], Freenet [24], etc.).

Este trabalho traz as seguintes contribuições:

- **Avaliação de protocolos de roteamento *ad hoc* sob uma rede P2P.** Recentemente, surgiram estudos sobre roteamento em redes P2P sobre MANETs de grande valia ao desenvolvimento da área. No entanto, os estudos que dizem respeito à avaliação ou a efetuaram de forma teórica, ou partiram de propostas novas e que ainda não foram suficientemente aferidas para serem aplicadas. Dito isso, nossa contribuição consiste em avaliar protocolos consolidados de roteamento em MANETs sob uma aplicação P2P. Para tal, utilizamos os protocolos DSR, DSDV e AODV. Com isso, estamos não só identificando as características dos protocolos que aumentam a eficiência deste tipo de rede, mas também apresentando uma base de comparação para futuras propostas com foco em redes P2P sobre MANETs.
- **Avaliação de protocolos P2P de localização de conteúdo sobre uma MANET.** Avaliamos duas técnicas de localização de redes P2P neste novo ambiente distribuído: estruturada e não estruturada. Para tal, empregamos dois protocolos utilizados na Internet, são eles o estruturado Chord e o não-estruturado Gnutella. Embora tais técnicas já tenham sido muito estudadas em redes cabeçadas convencionais, não temos conhecimento anterior de estudos voltados para redes P2P sobre MANETs. Com isso, também estamos contribuindo para identificar características dos protocolos – e de suas respectivas estratégias – que colaboram para o melhor desempenho do sistema.

Com isso, contribuímos tanto para o desenvolvimento de protocolos de roteamento *ad hoc* que aumentem o desempenho de redes P2P sobre MANETs, como para a elaboração de protocolos P2P de localização de conteúdo mais eficientes para redes P2P sobre MANETs. Além disso, nossos resultados podem ser utilizados para escolher a melhor combinação de estratégias *ad hoc* e P2P dado um certo cenário de rede.

As publicações geradas durante o curso de mestrado foram as seguintes:

1. **L. B. OLIVEIRA**, I. G. Siqueira, D. F. Macedo, A. A. F. Loureiro e H. C. Wong e J. M. Nogueira. *Evaluation of Peer-to-Peer Network Content Discovery Techniques over Mobile Ad Hoc Networks. IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WOWMOM'05)*. Taormina, Itália (Aceito para publicação).
2. **L. B. OLIVEIRA**, I. G. Siqueira, D. F. Macedo, A. A. F. Loureiro e H. C. Wong e J. M. Nogueira. *Avaliação de Técnicas P2P de Localização de Conteúdo sobre Redes Móveis*

Ad hoc. 23ºSimpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC'05). Fortaleza, Brasil (Aceito para publicação).

3. **L. B. OLIVEIRA**, H. C. Wong e A. A. F. Loureiro. LHA-SP: *Secure protocols for Hierarchical Wireless Sensor Networks 9th IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management (IM'05)*. Nice, França (Aceito para publicação).
4. Adrian C. Ferreira, Marco A. Vilaça, **L. B. OLIVEIRA**, H. C. Wong e A. A. F. Loureiro. *On the Security of Cluster-Based Communication for Wireless Sensor Networks. 4th IEEE International Conference on Networking (ICN'05)*. Reunion Island (Aceito para publicação).
5. **L. B. OLIVEIRA**, I. G. Siqueira e A. A. F. Loureiro. *On the Performance of Ad hoc Routing Protocols under a Peer-to-Peer Application, Journal of Parallel and Distributed Computing (JPDC): special issue on the Design and Performance of Networks for Super-, Cluster-, and Grid-Computing* (Aceito para publicação).
6. **L. B. OLIVEIRA**, H. C. Wong, A. A. F. Loureiro e D. M. Barbosa. Um Protocolo de Segurança para Redes de Sensores Hierárquicas. 22ºSimpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC'04). Gramado, 2004 (p.175-188).
7. L. B. Ruiz, I. G. Siqueira, **L. B. OLIVEIRA**, H.C. Wong, A. A. F. Loureiro e José M. S. Nogueira. *Fault Management in Event-Driven Wireless Sensor Networks. ACM/IEEE International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWIM'04)*. Itália, Veneza, 2004 (p. 149-156).
8. D. F. Macedo, **L. B. OLIVEIRA** e A. A. F. Loureiro. Integrando Redes Overlay em Redes de Sensores Sem fio. *Revista do Instituto Nacional de Telecomunicações (INATEL)*, volume 7, número 1, ano 2004 (p. 36-43).
9. **L. B. OLIVEIRA**, I. G. Siqueira e A. A. F. Loureiro. *Evaluation of Ad hoc Routing Protocols under a Peer-to-Peer Application, IEEE Wireless Comm. and Networking Conference (WCNC'03)*. EUA, Nova Orleans, 2003 (p.1143-1148).
10. J. M. Nogueira, A. A. F. Loureiro, Ana P. R. Silva, D. F. Macedo, **L. B. OLIVEIRA** e F. A. Teixeira. Artemis: Uma Ferramenta para Operação de Eventos para Sistemas

de Gerenciamento de Redes de Telecomunicações. 21º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC'03). Natal, 2003 (p.913-921).

11. J. M. Nogueira, A. A. F. Loureiro, A. P. R. Silva, D. F. Macedo, **L.B. OLIVEIRA** e F. A. Teixeira. *Artemis: An Event Operation Tool for Telecommunication Management Systems, III IEEE Latin American Network Operations and Management Symposium, 2003 (LANOMS'03)*. Foz do Iguaçu, Setembro, 2003 (p.73-80).
12. D. F. Macedo, **L. B. OLIVEIRA** e A. A. F. Loureiro. Integrando Redes *Overlay* em Redes de Sensores Sem fio. V Workshop de Comunicação sem Fio (WCSF'03). São Lourenço, 2003 (p.190-198).

No entanto, aqueles relativos exatamente à dissertação de mestrado são os seguintes.

1. **L. B. OLIVEIRA**, I. G. Siqueira, A. A. F. Loureiro. *On the Performance of Ad hoc Routing Protocols under a Peer-to-Peer Application, Journal of Parallel and Distributed Computing (JPDC): special issue on the Design and Performance of Networks for Super-, Cluster-, and Grid-Computing* (Aceito para publicação).
2. **L. B. OLIVEIRA**, I. G. Siqueira, D. F. Macedo, A. A. F. Loureiro e H. C. Wong e J. M. Nogueira. *Evaluation of Peer-to-Peer Network Content Discovery Techniques over Mobile Ad Hoc Networks. IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WOWMOM'05)*. Taormina, Itália (Aceito para publicação).
3. **L. B. OLIVEIRA**, I. G. Siqueira, D. F. Macedo, A. A. F. Loureiro e H. C. Wong e J. M. Nogueira. Avaliação de Técnicas P2P de Localização de Conteúdo sobre Redes Móveis Ad hoc. 23º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC'05). Fortaleza, Brasil (Aceito para publicação).
4. **L. B. OLIVEIRA**, I. G. Siqueira, A. A. F. Loureiro. *Evaluation of Ad hoc Routing Protocols under a Peer-to-Peer Application, IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC'03)*. New Orleans, 2003 (p.1143-1148).

Também é importante mencionar que este trabalho surgiu, originalmente, de um trabalho final de graduação, o qual resultou em uma publicação (**L.B. OLIVEIRA**, I.G. Siqueira, A.A.F. Loureiro, Avaliação de Protocolos de Rotameento de Redes Móveis Ad Hoc sob uma

Aplicação Peer-to-Peer, IV Workshop de Comunicação sem Fio (WCSF'02). São Paulo, 2002 (p.197-206)) e um prêmio internacional (IEEE *Student Paper Contest* 2003, 2º lugar, região 9, disponível em [25]).

1.4 Organização

O restante deste trabalho está organizado da seguinte maneira. O Capítulo 2 apresenta os conceitos e problemas que guiaram e motivaram o trabalho. Nele são descritas MANETs e redes P2P; estratégias de roteamento de MANETs; estratégias de localização de conteúdo em redes P2P; e, ao final, é feita uma comparação de ambas as redes. Ao longo deste Capítulo também são discutidos os protocolos utilizados no trabalho – Chord, Gnutella, DSR, DSDV e AODV. O Capítulo 3 apresenta os trabalhos correlatos. No Capítulo 4 apresentamos a plataforma de avaliação (modelo de rede, implementação dos protocolos, simulador utilizado, etc.) O Capítulo 5 apresenta a avaliação dos protocolos de roteamento *ad hoc* e o Capítulo 6 a avaliação dos protocolos P2P de localização de conteúdo. Uma cuidadosa discussão de resultados é feita no Capítulo 7. Finalmente, concluímos e levantamos possíveis trabalhos futuros no Capítulo 8.

Capítulo 2

Conceitos

2.1 MANETs

MANETs são redes compostas por dispositivos de baixo poder computacional capazes de trocar informações diretamente entre si usando enlaces sem fio [37, 38]. Originaram-se a partir de um projeto do departamento de defesa americano conhecido como *Packet Radio Network* (PRNET) [38].

Elas são auto-organizáveis e não dependem de prévia infra-estrutura para serem colocadas em operação, razão pela qual são chamadas de *ad hoc*¹. Por causa disso, elas são comumente empregadas em situações de desastre (como furacões, terremotos, inundações, etc.) e em campos de batalha, em que equipes de resgate precisam se coordenar e a estrutura de comunicação, em geral, é inexistente ou foi danificada. Além disso, MANETs podem ser utilizadas por grupo de pessoas para tornar uma reunião ou aula interativa.

2.1.1 Roteamento em MANETs

Protocolos de roteamento *ad hoc* podem ser divididos em reativos, que buscam rotas sob demanda; e pró-ativos, que buscam rotas periodicamente. Os reativos resultam em menor *overhead* de comunicação e memória, visto que rotas só são procuradas e armazenadas quando demandadas. O lado negativo é que seu tempo de resposta é maior. Os pró-ativos, ao contrário, acarretam maior *overhead*, mas atendem às requisições de rota com maior eficiência.

Abaixo descreveremos brevemente os protocolos de roteamento utilizados neste trabalho.

¹Ao pé da letra, o termo *ad hoc* significa “para isso”, isto é, para um fim específico. No entanto, o termo também possui a conotação de improvisado, não planejado [39, 40].

DSDV

O DSDV [15] é um protocolo adaptado para MANETs do modelo de roteamento baseado em vetor de distância (*distance vector routing* [41]). Cada nó ² mantém uma tabela de rotas (contendo o próximo *hop* de todos os destinos alcançáveis), e, periodicamente, transmite atualizações de rota para os nós em sua vizinhança. Para assegurar que não ocorram *loops*, um número de seqüência é atribuído a cada atualização. Além disso, um outro tipo de atualização, denominado *triggered update*, é enviado pelos nós para gerenciar modificações na topologia que ocorrem entre as atualizações periódicas.

O DSDV é tido como um protocolo caro em termos de largura de banda e energia. Seu alto custo é devido aos seus constantes *broadcasts* – transmitidos para manter a tabela de rotas consistente – e ao período inicial de convergência, durante o qual as rotas não são conhecidas e os pacotes são descartados.

DSR

O DSR [14] é um protocolo sob demanda que emprega a estratégia de *source routing* (pacotes deixam o nó fonte com toda a rota já definida). Cada pacote contém o caminho a ser percorrido da origem ao destino. Tal caminho é descoberto através do envio de uma consulta por *flooding*, a partir da origem, que carrega a seqüência dos *hops* por onde passa. Quando o destino é alcançado, o mesmo envia uma resposta que simplesmente copia a seqüência de *hops* e circula de volta à origem da consulta. Cada rota completa que é descoberta permanece armazenada em *cache*. As falhas em rotas são detectadas quando ocorre o insucesso de uma transmissão. Nesse caso, é gerado um pacote de erro que retorna à origem e apaga dos nós intermediários as rotas que contenham o enlace falho. Usando esse algoritmo, os nós não são obrigados a manter informações de roteamento atualizadas e *broadcasts* periódicos são desnecessários. Logo, apesar do tamanho dos pacotes ser maior, visto que contêm o caminho a ser percorrido até o destino, o custo de roteamento é menor.

AODV

O AODV [16] é uma variação dos protocolos de vetor de distâncias que funciona sob demanda. É um protocolo reativo, somente requisitando rotas quando necessário e não demanda

²Neste trabalho, para distinguirmos entre membros de MANETs e membros de redes P2P, utilizamos nós para MANETs e *peers* para redes P2P. Note-se, no entanto, que ambos são nós de suas respectivas redes.

que os nós armazenem caminhos que não estão sendo utilizados. O AODV usa números de seqüência como o DSDV para manter atuais as informações de roteamento, mas, assim como o DSR, descobre rotas através de requisições por *flooding*. Além disso, os nós enviam mensagens de sinalização periodicamente aos vizinhos para indicar sua atividade. Se um nó não obtiver resposta de um determinado vizinho, o enlace que os conecta é marcado como “quebrado” na tabela de rotas e os nós interessados neste enlace são notificados.

2.2 Redes P2P

A Internet como originalmente concebida no final dos anos 60 era um sistema P2P [42]. O objetivo inicial da ARPANET era compartilhar recursos entre as diversas regiões dos EUA, e os primeiros *hosts* da rede eram independentes e possuíam capacidades computacionais semelhantes. A relação entre os *hosts* não era baseada no paradigma cliente/servidor e eles atuavam como *peers*. Desta forma, conclui-se que a Internet, em seus primórdios, também era um rede P2P.

Redes P2P são caracterizadas por terem participantes com capacidades e papéis semelhantes e, por sua vez, são chamados de *peers*³. Ao contrário das redes baseadas no paradigma cliente/servidor, em que um único servidor é encarregado de responder a requisições de todo o resto da rede, isto é, a toda gama de clientes, nas redes P2P integrantes possuem uma interface dual, ora agindo como servidores e atendendo às requisições, ora efetuando suas próprias requisições a outros integrantes. Por causa disso, os *peers* são também conhecidos por *servents* (*server/client*) [43].

2.2.1 Localização de Conteúdo em Redes P2P

A localização de conteúdo é um problema conhecido e simples de ser descrito. De acordo com Hariet *al.* [44], um indivíduo *A* insere um item *X*, digamos um arquivo, no sistema. Mais tarde, um outro indivíduo *B* deseja ter acesso a esse item. O problema se resume, então, ao seguinte: Como o indivíduo *B* encontrará a localização do item *X* no sistema caso o indivíduo *A* não esteja mais *online*. Em geral, redes P2P buscam solucionar este problema.

A forma com que conteúdo é localizado em uma rede P2P depende da forma com que ela se organiza. Essa última, por conseguinte, varia com a abordagem que a rede segue.

³O termo *peer* denota equivalência, “ser igual ao outro” seja em *status*, classe, etc [40, 39]

Existem atualmente duas principais abordagens de redes P2P, as não-estruturadas e as estruturadas [45, 46]. Nas não-estruturadas (Freenet, Napster e Gnutella, por exemplo), o conteúdo pode ser armazenado em qualquer *peer* da rede e a busca por ele é, em geral, feita por meio de *flooding*. Nas estruturadas (Chord, Past, Pastry, CAN e Tapestry, por exemplo), por sua vez, a localização de conteúdo é otimizada através do emprego de tabelas *hash* distribuídas (DHT – *Distributed Hash Table*), as quais ajudam a determinar o caminho direto à informação desejada.

Embora a localização de conteúdo em redes P2P estruturadas seja otimizada, isso não reflete, necessariamente, em melhor custo-benefício. Sua necessidade de criar índices e distribuir informações entre os *peers* de forma justa acarreta alto *overhead*. Logo, é conveniente que ambas as abordagens – estruturadas e não-estruturadas – sejam consideradas na hora de se optar por um protocolo P2P.

A seguir, descreveremos brevemente o protocolo não-estruturado Gnutella e o estruturado Chord. Esses protocolos também serão empregados nas avaliações descritas nos Capítulos 5 e 6.

Gnutella

Gnutella propaga suas requisições por meio de *flooding* controlado. Sempre que um *peer* recebe uma requisição, ele tenta resolvê-la. Caso consiga, uma mensagem de resposta é enviada ao *peer* requerente diretamente. Caso contrário, o *peer* de posse da requisição a redireciona para todos os *peers* de sua lista de vizinhos.

O protocolo Gnutella implementa soluções para problemas de propagação indefinida de requisições. Ele possui um campo de *Time-to-Live* (TTL) similar ao do protocolo IP em suas mensagens de requisição, que é decrementado a cada *hop* e cada um de seus *peers* mantém uma *cache*. Ao receber uma mensagem, *peers* verificam tanto o TTL da mesma, quanto o seu *cache*. Mensagens com TTL igual a zero ou que já foram registradas antes na *cache* são descartadas.

Chord

No protocolo Chord [17], *peers* são freqüentemente responsáveis por no máximo $\frac{1}{n}$ de todos os arquivos de rede, sendo n o tamanho da rede, isto é, o número de *peers* que ela possui. Isto faz com que a memória e largura de banda sejam balanceadas entre os *peers* e melhora o

desempenho do sistema.

O protocolo implementa buscas eficientes ao utilizar uma tabela chamada de *finger* (*finger table*), a qual armazena índices para viabilizar buscas em $O(\log n)$ tentativas.

De acordo com a especificação do protocolo [17], *peers* são arranjados em um anel chamado de *Chord ring*. A posição de um *peer* no anel é seu identificador módulo 2^n . Para manutenção das referências para vizinhos no *Chord ring* – as quais podem tornar-se inconsistentes devido a entrada e saída de *peers* –, *peers* periodicamente executam a função *stabilize*.

2.3 Comparação entre MANETs e Redes P2P

MANETs e redes P2P são semelhantes em inúmeros aspectos. Para começar, MANETs também são constituídas de entidades pares, isto é, em geral, dispositivos de uma rede *ad hoc* possuem capacidades computacionais semelhantes e podem tanto prover informações, como requerê-las.

MANETs e redes P2P não possuem entidades centrais e são auto-organizáveis. Em MANETs, geralmente, requisições são feitas a vizinhos físicos, enquanto nas redes P2P as requisições são enviadas a vizinhos lógicos. Os sistemas também são auto-organizáveis, isto é, não existe uma forma ou momento pré-definido de organização, posto que a rede é estabelecida tão logo os participantes optem por interagirem uns com os outros – a auto-organização é um dos fatores que tornam as esses sistemas fáceis de serem implantados.

A Topologia dinâmica é outra característica em comum entre as redes. Uma vez que a decisão por entrar na rede pode ocorrer em momentos diferenciados para cada nó e/ou *peer*, a topologia de ambas as redes estão em constante alteração. Nas MANETs a topologia dinâmica deve-se sobretudo à mobilidade dos nós, que acarreta quebra de enlaces físicos e leva os dispositivos a ativarem outros. Nas redes P2P, por outro lado, essa dinâmica é resultante da constante modificação das conexões virtuais usadas pelos *peers*.

Todavia, em função do ambiente em que MANETs e redes P2P foram construídas, esses sistemas também apresentam diferenças. Redes P2P, por exemplo, são normalmente construídas sobre uma infra-estrutura física e estável e buscam criar uma infra-estrutura lógica sobreposta. MANETs, ao contrário, implementam seu próprio suporte à comunicação e possuem mobilidade e comunicação sem fio. Outra diferença diz respeito a vizinhança. Nas MANETs, os vizinhos de um nó estão realmente a um *hop*; em redes P2P os vizinhos são lógicos e podem

estar geograficamente distantes. Na Tabela 2.1 são listadas as diferenças básicas entre as duas tecnologias.

Propriedade	Rede P2P	MANET
Motivação para criar a rede	criar uma infra-estrutura lógica para prover um serviço	criar uma infra-estrutura física para conectividade
Confiança das conexões	alta (comunicação cabeadas, redundância de rotas)	baixa (conexões sem fio)
Localização dos peers	qualquer ponto da Internet	área restrita
Estrutura	estrutura física separada da estrutura lógica	estrutura física corresponde à estrutura lógica
Mobilidade	fixos durante uma mesma sessão	móveis

Tabela 2.1: Diferenças entre MANETs e redes P2P

Capítulo 3

Trabalhos Relacionados

Apenas recentemente a comunidade de pesquisa atentou para a sinergia entre MANETs e redes P2P. Os trabalhos pioneiros compararam as redes apresentando suas similaridades e diferenças. Já os mais recentes propuseram soluções para ambientes em que MANETs e redes P2P coexistem.

Schollmeier *et al.* [26] e Borg [3] levantaram características em comum e as diferenças entre os dois tipos de rede. O primeiro focou principalmente em aspectos de roteamento e, ao final do trabalho, levantou questões sobre como seria a localização de conteúdo através de protocolos P2P que se inspirassem em protocolos de roteamento *ad hoc*. Analogamente, indagou se o uso de funções *hash* e/ou *bloom filters* em protocolos de roteamento *ad hoc* poderia diminuir o tráfego da rede. Já Borg [3] efetuou uma extensa discussão sobre aspectos de descoberta de *peers/nós*, roteamento, localização de conteúdo, segurança, qualidade de serviço, etc., de ambas as redes. Em relação aos sistemas P2P e MANETs, Borg identificou três principais semelhanças (natureza descentralizada, heterogeneidade de conteúdo entre *peers/nós*, e conectividade temporária entre os *peers*).

Kortuem *et al.* propuseram *Proem* [27, 28], uma plataforma de *middleware* para desenvolver e disponibilizar aplicações P2P voltadas para PANs (*Personal Area Networks*), um tipo especial de MANET em que existem poucos dispositivos e as transmissões são de curto alcance. Os primeiros resultados do uso da plataforma foram satisfatórios, pois aumentaram o desempenho de engenheiros de *software* no desenvolvimento de soluções P2P para MANETs.

Papadopouli e Schulzrinne [29, 30], e Klemm *et al.* [31] apresentaram sistemas de compartilhamento de dados P2P voltados exatamente para MANETs. São eles, respectivamente: *Seven Degrees of Separation* (7DS) e *Optimized Routing Independent Overlay Network* (ORION). 7DS é uma arquitetura que, por meio de um conjunto de protocolos, possibilita troca de dados en-

tre *peers* que não estão diretamente conectados à Internet ao explorar a mobilidade dos nós. Para isso, são empregadas técnicas P2P de compartilhamento de dados. Já o ORION consiste de um algoritmo de construção e manutenção de uma rede *overlay* que proporciona troca de mensagens P2P, isto é, requisições, respostas e transferência de arquivos. Em sua abordagem, conexões são feitas sob demanda e mantidas apenas quando necessárias. Além disso, ORION busca construir a rede *overlay* de forma a refletir a rede subjacente. Dessa forma, o atraso e o *overhead* são minimizados.

Franciscani *et al.* [32] concentraram esforços em minimizar o impacto que a topologia altamente dinâmica de redes P2P sobre MANETs pode ter nos recursos do sistema. Para isso, propuseram quatro algoritmos de configuração e reconfiguração de sistemas P2P sobre MANETs. O primeiro, chamado de básico, foi inspirado no Gnutella e serviu de base de comparação para os demais algoritmos propostos. Os outros três possuíam o foco na otimização da configuração e reconfiguração da topologia, são eles o *regular*, *aleatório*, e o *híbrido*. Enquanto no *regular peers* conectam-se a vizinhos próximos (físicos), no *aleatório* parte da atribuição de vizinhos é feita de forma aleatória, buscando o fenômeno *small-world* [33, 34]. Finalmente, no algoritmo *híbrido*, as conexões são feitas seguindo uma hierarquia, em que *peers* se comunicam por intermédio de um outro.

Ding e Bhargava [35] propuseram 5 abordagens de roteamento para redes P2P sobre MANETs. As abordagens são construídas através da combinação de estratégias de localização de conteúdo P2P e de roteamento *ad hoc*, isto é, DHT (vide Seção 2.2.1) e *broadcast*. Eles utilizaram as seguintes combinações para a camada P2P *overlay* e a de roteamento *ad hoc*: *broadcast* (virtual) sobre *broadcast* (físico), DHT sobre *broadcast* (físico) e DHT sobre DHT. Além disso, também foram avaliados *broadcast* e DHT como protocolos *cross-layer*, isto é, um único protocolo para as duas camadas.

A estratégia *broadcast* sobre *broadcast* apresentou como vantagem principal a facilidade de implementação, porém não foi escalável por causa do *broadcast* duplo. Sua complexidade foi dado como $O(n^2)$, sendo n o número de *peers*. A estratégia *broadcast* também apresentou restrições de escalabilidade, no entanto, sua complexidade foi $O(n)$.

As demais estratégias que empregam DHT, em especial DHT sobre DHT, como já era esperado, aumentaram a complexidade da implementação. Todavia, em termos de complexidade, tais estratégias mostraram-se mais vantajosas. As complexidades para DHT sobre *broadcast*, DHT sobre DHT e DHT apenas foram, respectivamente, $O(n \log n)$, $O((\log n)^2)$ e $O(\log n)$.

Além disso, as duas últimas ofereceram gastos de energia mais eficientes.

Apesar dos importantes resultados, Ding e Bhargava não avaliaram protocolos P2P realmente adotados (Chord, Pastry, Gnutella, etc.), nem protocolos de roteamento *ad hoc* consolidados (DSR, DSDV, AODV, etc.). Além disso, o trabalho proposto não considera aspectos práticos (como mobilidade e erro do canal).

Há também propostas que integraram conceitos de ambos os sistemas, isto é, de MANETs e redes P2P. Hu *et al.* [36], por exemplo, propuseram um protocolo de roteamento *ad hoc* dinâmico chamado DSPR (*Dynamic P2P Source Routing*). Para melhorar a escalabilidade, o protocolo integra estratégias de roteamento do DSR e técnicas P2P de localização de conteúdo do Pastry [21].

Capítulo 4

Modelo de Rede e Implementação de Protocolos

Neste capítulo descrevemos o modelo de rede considerado no trabalho (Seção 4.1) e discutimos o esforço de implementação necessário para viabilizar as avaliações (Seção 4.2).

4.1 Modelo de Rede

Em função do incipiente estudo de redes P2P sobre MANETs, ainda não existem modelos reais nos quais poderíamos basear nossos experimentos. Optamos, então, por modelar nossa rede a partir de uma aplicação voltada para grupos de busca e resgate em situações de desastre (terremotos, maremotos, tsunamis etc). Nesta aplicação, integrantes dos grupos seriam equipados com dispositivos de comunicação sem fio (*handhelds*, *palmtops*, PDAs – *Personal Digital Assistance* – etc.) e formariam uma MANET em que trocariam conteúdo (arquivos com tamanho seguindo a distribuição uniforme com média de 10 KB) entre si através de uma rede P2P. Consideramos que um mesmo conteúdo poderia estar localizado em diferentes integrantes, isto é, réplicas eram possíveis. Além disso, cada integrante possuía inicialmente 10 (de um total de 100) tipos distintos de conteúdo. A distribuição do conteúdo entre os integrantes foi feita de maneira aleatória. Note-se que para a transmissão de apenas voz uma estratégia mais eficiente seria o emprego de rádio, mas acreditamos que em aplicações como essa outras formas de conteúdo (como arquivos de fotos dos locais acidentados) também deverão ser compartilhados. Além disso, enquanto a comunicação via rádio demandaria dos integrantes estar sempre atentos à comunicação, a aplicação P2P sobre MANET proporciona ao interessado a autonomia de buscar apenas o conteúdo desejado e quando bem lhe entender.

Falhas de enlace podem acontecer em nosso modelo, visto que são suscetíveis ao ambi-

ente [49]. Como será visto durante os resultados, existem momentos em que variamos a qualidade do canal (taxa de erro) para avaliarmos propriedades. O modelo assume qualidade de enlace homogênea, em que todos os enlaces da rede possuem taxas de erro equivalentes.

A aplicação que instancia a rede P2P é executada sobre o protocolo UDP [41], não havendo ACKs [41] e/ou retransmissões de mensagens perdidas.

Sempre que houver mobilidade, os nós estarão seguindo o modelo *random way-point* [6], que é usualmente empregado para modelar mobilidade de indivíduos [6]. Este modelo alterna o estado do nó entre períodos de repouso e de mobilidade. Por exemplo, após esperar um tempo (tempo de repouso) no local em que se encontra, o nó escolhe aleatoriamente uma posição e se desloca para ela em velocidade uniforme escolhida a partir de um intervalo dado.

Modelamos reposição e revezamento de integrantes de grupos através da saída e entrada de nós. Essa dinâmica seguiu a distribuição uniforme para escolha de nós que entram e saíam.

O modelo de comunicação entre os nós foi baseado no padrão IEEE 802.11 [41], com raio de alcance de 50 m. Além disso, os gastos de energia com envio e recepção de mensagens foram 330 mW e 230 mW, respectivamente [50].

Finalmente, em nosso modelo não consideramos falhas por falta de energia e nós foram dispostos em uma área de 200×200 m.

4.2 Descrição dos Protocolos P2P Implementados

A fim de alcançar os objetivos descritos na Seção 1.2, foi necessária a implementação de dois protocolos P2P, um estruturado e outro não. Optamos pelos protocolos estruturado Chord e não-estruturado Gnutella, respectivamente, pois são consolidados, difundidos e existe vasta documentação sobre os mesmos.

Em nossa implementação do Gnutella, para cada *peer* que entra na rede, são escolhidos aleatoriamente um número fixo de outros *peers* que estão *online* que são atribuídos a lista de vizinhos do que acabara de entrar. Essa atribuição é semelhante a redes Gnutella existentes na Internet que possuem servidores que servem como ponto de entrada na rede. Para manter atualizada a lista de vizinhos P2P, os *peers* periodicamente enviam mensagens de *ping* para sua vizinhança e ficam a espera de mensagens *pong* como resposta. Aqueles vizinhos que não responderem são substituídos ou por nós da vizinhança física (descobertos através de mensagens de *broadcast*), ou por escolhas aleatórias dentre os nós que estão *online* no momento.

Durante a explanação dos resultados, a forma de substituição será explicitada.

Ao longo deste capítulo algumas vezes referimos a mensagens específicas do Gnutella. Na Tabela 4.1 apresentamos as mensagens usados pelo protocolo e suas respectivas funções.

Mensagem	Função
broadcast-send	Procura por vizinhos
broadcast-reply	Responde um broadcast-send
ping	Checa conexão com vizinhos
pong	Responde um ping
query-send	Requisição de localização de conteúdo
query-reply	Resposta a uma requisição (um <i>hit</i> ocorreu)
push-request	Requisição de transferência de conteúdo
pull-request	Transmissão de conteúdo

Tabela 4.1: Tipos de mensagens de uma rede P2P Gnutella

Em relação ao Chord, nós implementamos seu conjunto completo de funcionalidades, incluindo os protocolos necessários para construção e manutenção dos índices distribuídos. Também implementamos as operações de inserção e exclusão, usando protocolos similares ao de busca.

Os protocolos foram implementados sobre a plataforma de simulação do ns-2 (*Network Simulator*) [47] e seu módulo de comunicação sem fio e mobilidade [48]. A escolha pelo simulador deve-se ao fato do mesmo ser amplamente utilizado pela comunidade científica e já possuir implementações consolidadas dos protocolos de roteamento *ad hoc* DSR, AODV e DSDV.

Capítulo 5

Avaliação de Roteamento em MANETs sob Redes P2P

Neste Capítulo, apresentamos os resultados da avaliação dos protocolos de roteamento *ad hoc* DSR, DSDV e AODV sob uma rede P2P Gnutella. Entretanto, antes dos resultados propriamente ditos, descrevemos a seguir a configuração do conjunto de simulações efetuados durante a avaliação.

5.1 Simulação

Os resultados da simulação foram divididos por propriedade avaliada. São elas:

- Carga da rede
- Mobilidade
- Densidade de *peers*
- Densidade da rede

Para alcançar tais propriedades, variamos um ou mais parâmetros de um conjunto. Este conjunto foi guiado por um padrão que segue o modelo descrito na Seção 4.1, porém com os respectivos adendos.

A rede foi composta de 40 nós, 12 deles implementando uma instância da aplicação P2P. O tempo de repouso e a velocidade máxima de cada nó foram, respectivamente, 50 s e 0.5 m/s. A largura de banda foi configurada para 2 Mbps por segundo. O número máximo de vizinhos de um *peer* do Gnutella foi 3.

Cada simulação durou 300 s e foi executada 33 vezes, sendo que cada execução alimentou o gerador de números aleatórios do simulador com uma semente distinta das demais. Os resultados apresentados representam a média das 33 execuções.

5.2 Métricas

A seguir descrevemos algumas das principais métricas consideradas durante a avaliação.

- **de roteamento:** número total de mensagens de roteamento enviadas durante a simulação.
- **Atraso:** o atraso percebido pelo usuário ao requerer conteúdo. Ele inclui o tempo de transmissão e localização e envio de resposta a uma requisição.
- **Consumo de energia:** consumo médio de energia por nó da MANET durante toda a simulação.
- **Número de requisições não respondidas:** número de requisições que não encontraram o conteúdo procurado.
- **Taxa de entrega:** número de mensagens P2P que alcançaram o destinatário com sucesso.
- **Número de hops:** número de *hops* médio que um requisição percorreu para alcançar o conteúdo requerido.
- **Conectividade entre os** : facilidade com que um *peer* preenche sua lista de vizinhos e disponibilidade dos mesmos.

5.3 Carga da Rede

Ao aferirmos o comportamento dos protocolos variando a carga da rede analisamos a escalabilidade e a capacidade dos mesmos. A variação de carga nessa seção deu-se através da variação do número de requisições por *peer* (1, 10, 100 e 1.000) e da variação do tamanho dos arquivos de conteúdo (médias de 1, 10, 100 e 1.000 KB). Para avaliar essa propriedade levamos em conta as seguintes métricas: número de arquivos transferidos, requisições não respondidas, consumo de energia, *overhead* de roteamento e taxa de entrega da rede P2P.

Os três protocolos de roteamento introduziram diferentes quantias de *overhead* quando variamos o número de requisições por *peer*. Como mostrado na Figura 5.1(a), o DSDV exibiu o maior *overhead*, seguido do AODV e DSR. O primeiro, para uma requisição, acarretou em 10× mais pacotes de controle que o DSR. Tal resultado deve-se a estratégia pró-ativa do DSDV, que constantemente envia pacotes de atualização de rotas. Embora tenha apresentado o maior *overhead*, o DSDV mostrou estabilidade com o aumento da carga. Os demais, ao contrário, tiveram aumento de *overhead* e pareceram menos escaláveis – o *overhead* do DSR, especificamente, duplicou de um extremo ao outro do eixo X da Figura 5.1(a).

Em consequência de seu maior *overhead*, o DSDV foi também o que teve o maior consumo de energia para 1, 10 e 100 requisições por *peer* (Figura 5.1(b)).

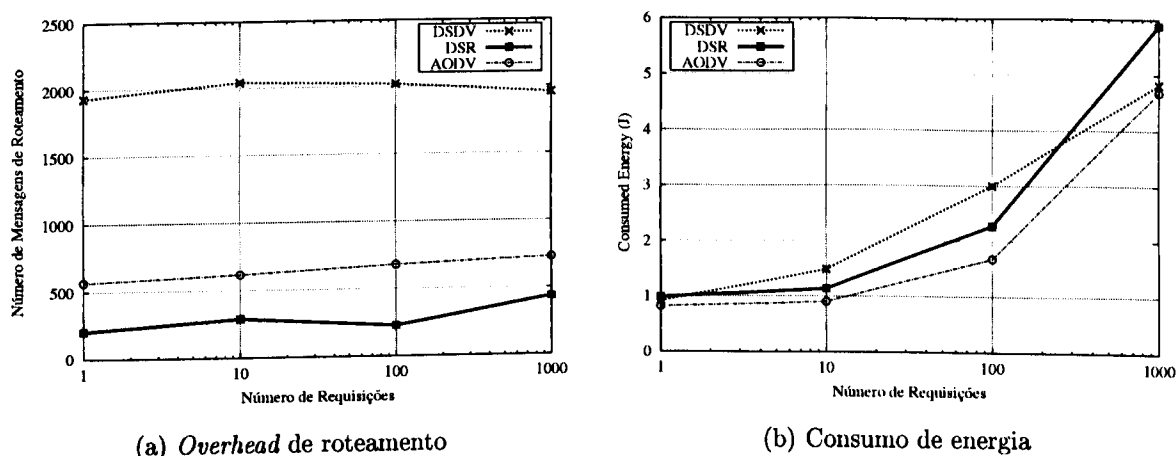


Figura 5.1: Variação do número de requisições por *peer*

A Figura 5.2(a) mostra a taxa de entrega da aplicação P2P, à medida que o tamanho dos arquivos foi incrementado. As curvas foram similares (delta máximo de 10%) para todos os protocolos. Observe que a taxa de entrega caiu drasticamente com o aumento do tamanho de arquivo. Enquanto ela foi de 90% para arquivos de 1 KB, a taxa caiu para praticamente zero com arquivos de 1.000 KB. Tal comportamento deveu-se a baixa largura de banda da rede.

Os resultados de transferência de arquivos de conteúdo (*pull-data*) indicaram que, para todos os protocolos, o melhor desempenho é atingido quando a média de tamanho de arquivo é 10 KB (Figura 5.2(b)). Essa métrica é importante, visto que mostra a eficiência de localização do conteúdo.

Sob cargas extremamente altas (arquivos de tamanho 1.000 KB), o DSDV desempenhou melhor. Neste contexto, ele apresentou o menor número de requisições não respondidas e

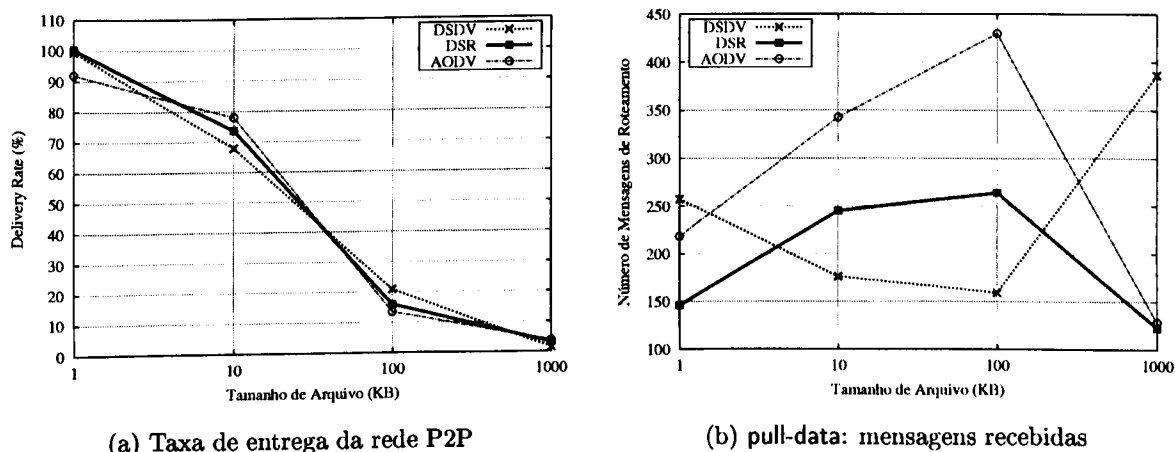


Figura 5.2: Variação do tamanho de arquivos

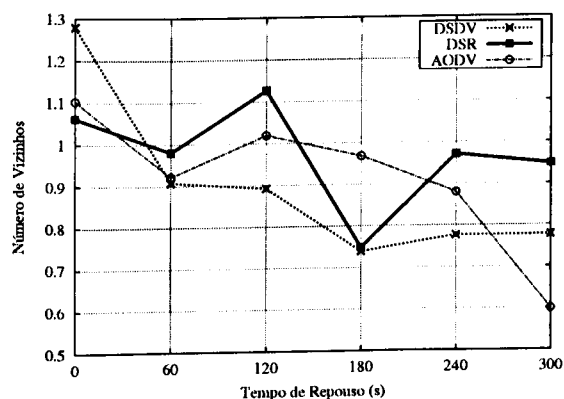
mais arquivos transferidos com sucesso. O DSR e o AODV, ao contrário, não suportaram tal demanda de carga (Figura 5.2(b)) e transferiram $4\times$ menos arquivos que o DSDV. O congestionamento devido ao alto tráfego de pacotes fez com que eles tivessem dificuldades em encontrar rotas sob demanda.

5.4 Mobilidade

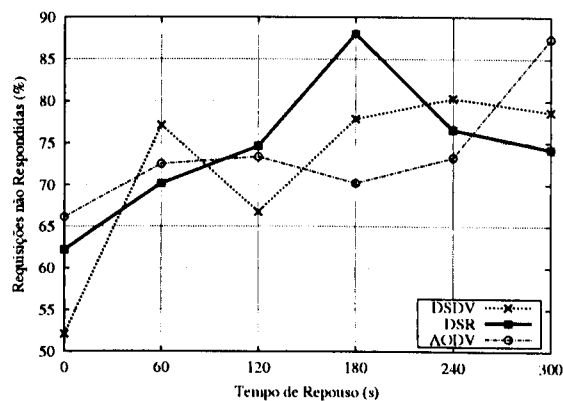
Essa propriedade busca aferir a capacidade dos protocolos de se adaptar a cenários com diferentes padrões de mobilidade. Para tal, variamos a velocidade dos nós (0.1, 0.5, 2.5 e 10 m/s) e o tempo de repouso (0, 60, 120, 180, 240 e 300 s). As métricas consideradas foram as seguintes: atraso, número de *hops* e conectividade entre os *peers*, isto é, média de vizinhos a facilidade de se preencher a lista de vizinhos.

As Figuras 5.3(b) e 5.3(a) mostram o comportamento das conexões entre os *peers*. Note-se que nenhum dos protocolos sobressaiu-se sobre os demais. Em baixas mobilidades, a média de vizinhos e o número de mensagens ping foram reduzidas, enquanto o número de mensagens broadcast-send e número de requisições não respondidas cresceu. Em outras palavras, todos os protocolos demonstraram indisponibilidade de conteúdo e baixa conectividade da rede P2P.

À medida que a mobilidade foi decrementada (isto é, o tempo de repouso foi incrementado), surpreendentemente, o grau de conectividade também decresceu (Figura 5.3(a)). A quantidade de vizinhos do AODV, por exemplo, caiu de 1.1 (Figura 5.3(a), tempo de repouso 0) para 0.6 (Figura 5.3(a), tempo de repouso igual ao da simulação, isto é, 300 s) Este comportamento



(a) Média de Vizinhos por nó

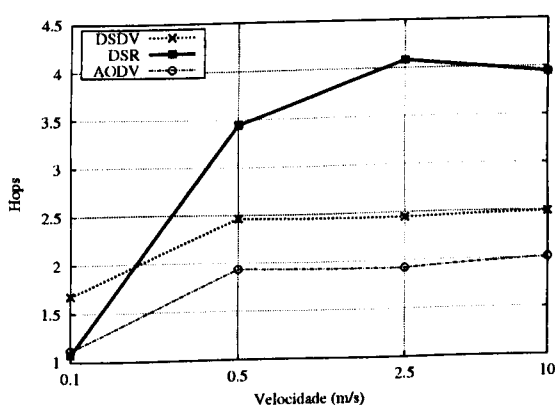
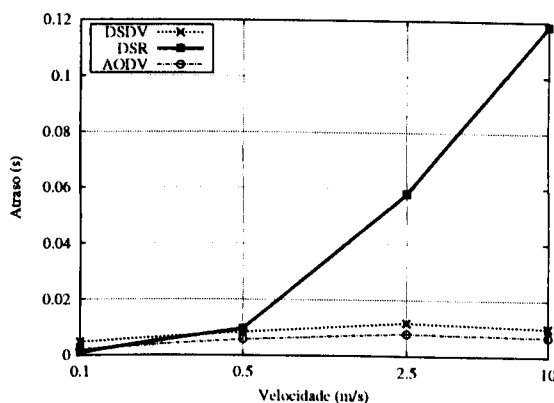


(b) Requisições não respondidas

Figura 5.3: Variação do tempo de repouso

aparentemente anômalo foi causado pelas partições da rede. Em cenários em que a rede começa particionada, a baixa mobilidade condena os *peers* a permanecerem isolados durante toda a simulação. Já com a mobilidade alta, ocorre reconfiguração da topologia física ao longo do tempo, dismantelando as partições. Em função disso, sob baixa mobilidade, o número de requisições não respondidas foi alto chegando próximo a 90% em alguns experimentos (Figura 5.3(b)).

A Figura 5.4(a) mostra que, acima de 2.5 m/s, o aumento da velocidade não influenciou significativamente no número médio de *hops* para efetuar um *hit*. É importante observar, no entanto, que o DSDV e o AODV se estabilizaram antes do DSR.

(a) Hops para efetuar um *hit*(b) Atraso para efetuar um *hit***Figura 5.4:** Variação de velocidade

A Figura 5.4(b) mostra o tempo percorrido entre o disparo de uma requisição (query-

send) ao encontro do conteúdo requerido (*hit*). Observe que tanto o DSDV quanto o AODV apresentaram comportamentos similares. Já o DSR mostrou-se mais sensível a velocidade e apresentou variação de atraso superior a $12\times$ ao longo da gama de simulações. De forma geral, o DSR foi o protocolo que apresentou o maior atraso e o número mais alto de *hops* em cenários de alta mobilidade. Ao contrário do AODV e DSDV que constroem sua rotas *hop a hop*, o DSR monta toda caminho no nó remetente, antes da mensagem ser enviada. Contudo, em ambientes com alta velocidade, em que a topologia torna-se extremamente dinâmica, uma rota pode torna-se desatualizada mesmo durante sua construção. Por conseguinte, o DSR demora a encontrar um caminho completo.

5.5 Densidade da Rede

A densidade da rede pode afetar de maneira significativa o comportamento dos protocolos de roteamento. Para essa propriedade, variamos o raio de alcance (1, 10, 100 e 100 m), o número de nós (0, 20, 40, 60 e 80 nós) e mantivemos o tamanho da área fixo. Dentre as métricas aferidas constam: atraso, *overhead* de roteamento, taxa de entrega e número de *hops*.

O DSDV, em função de seu alto *overhead* de roteamento, mostrou ser afetado de forma negativa pelo crescimento do número de nós da rede (Figura 5.5(a)).

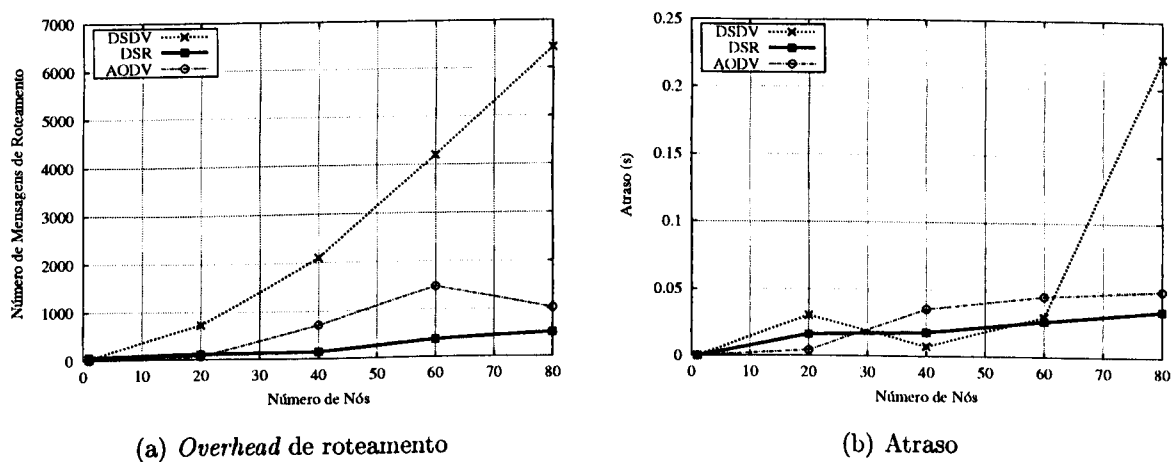


Figura 5.5: Variação do número de nós

Em relação a conectividade dos *peers*, os três protocolos apresentaram comportamentos equivalentes ao variarmos o número de nós e também o raio de alcance.

Todos eles tiveram o atraso intensificado em redes mais densas (Figura 5.5(b)). A res-

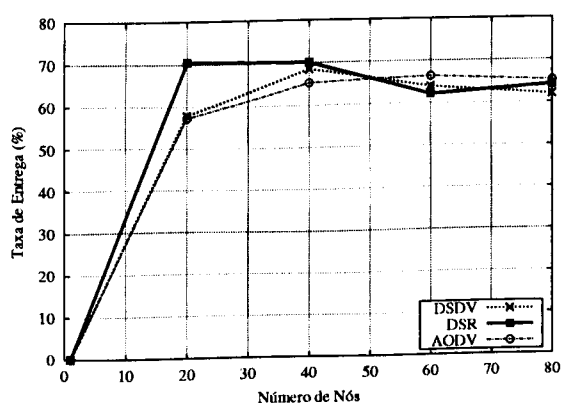
peito do DSDV, exatamente, seu atraso seguiu o *overhead* de roteamento (Figura 5.5(a)) e o protocolo apresentou a pior escalabilidade.

Com relação a requisições não respondidas, novamente os três protocolos apresentaram desempenho semelhante. Isso mostra que mesmo com o aumento do *overhead* de roteamento, o DSDV conseguiu manter sua taxa de entrega (Figura 5.6(a)).

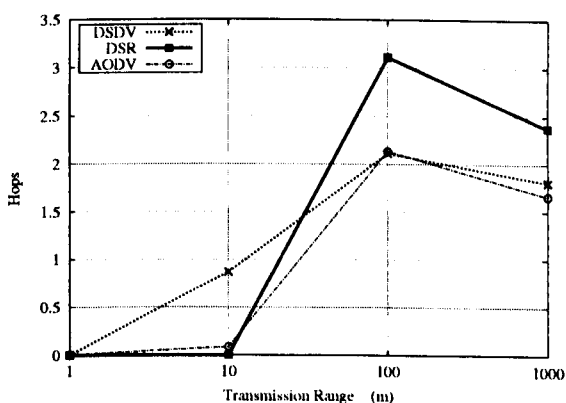
O tamanho do caminho, isto é, o número médio de *hops* por *hit*, mostrou-se sensível a densidade da rede (Figura 5.6(b)). A maior média de *hops* foi dada pelo DSR e DSDV, para redes mais densas (100 e 1.000 m de raio de alcance) e menos densas (10 m), respectivamente. O primeiro resultado é explicado pela sua estratégia do DSR de construir rotas no remetente. O último resultado, no entanto, pode ser considerado bom para o DSDV, visto que os

demais obtiveram média de *hops* próxima de zero. Ao contrário do que se pensa a primeira vista, a média de *hops* próxima de zero mostra a que o DSR e o AODV não conseguiram entregar mensagens em redes cujos alcances eram de apenas 10 m.

Outra fato importante a ser discutido é a variação do o número de *hops*. O aumento do número de nós possibilita uma mensagem percorrer trajetos maiores, e ocorre um aumento da média *hops*. Mas chega um certo ponto, que a possibilidade do conteúdo procurado ser localizado em uma área próxima também aumenta, diminuindo essa média. Tal diminuição também é observada quando é aumentado o raio de alcance (Figura 5.6(b)). Neste caso, entretanto, a diminuição deve-se ao fato de que um maior alcance possibilita o nó preencher sua lista de vizinhos com mais facilidade e, por conseguinte, efetuar um *hit* em menos *hops*.



(a) Taxa de entrega da rede P2P



(b) Número de *hops* para encontrar conteúdo

Figura 5.6: Variação do número de nós e do raio de alcance

5.6 Densidade de Peers

A fim de investigarmos a influência da densidade de *peers* sobre os protocolos de roteamento, mantivemos o número de nós igual a 40, mas variamos o quantidade de nós que executava a aplicação P2P. Em outras palavras, variamos o número de *peers* da rede (10, 20, 30 e 40 *peers*). As métricas avaliadas foram as seguintes: atraso, *overhead* de roteamento, consumo de energia e número de *hops*.

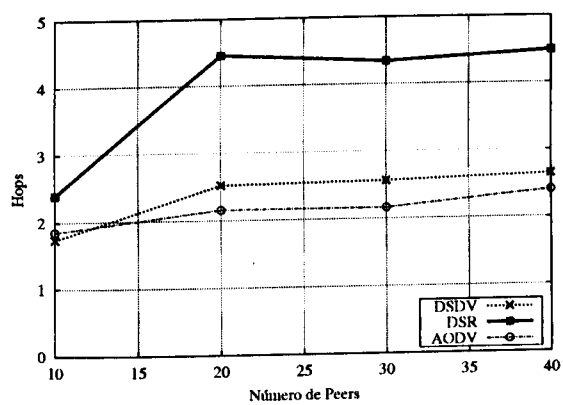
Pela Figura 5.7(a), podemos observar que quanto menor o número de *peers*, menor foi caminho percorrido para se efetuar um *hit*. Com poucos *peers* na rede, aumentou-se a chance da rede P2P ficar particionada e, por sua vez, diminui-se a chance do conteúdo procurado ser localizado. Contudo, nos raros casos em que foi encontrado, o conteúdo pertencia a um nó próximo (na mesma partição) ao nó requerente. Desta forma, o caminho percorrido diminuiu ¹. O aumento do número de *peers*, por outro lado, possibilitou o dado ser encontrado em um maior número de *hops* P2P e, por sua vez, em um maior número de *hops* físicos. Finalmente, após um certo número de *peers* na rede (20, no caso), este parâmetro não mais influencia o tamanho do caminho percorrido.

Em relação ao protocolos, o DSR precisou de mais *hops* para efetuar *hits* que os demais protocolos – 2× mais que o AODV no pior caso. Apesar disso, o comportamento das curvas é similar para todos os protocolos.

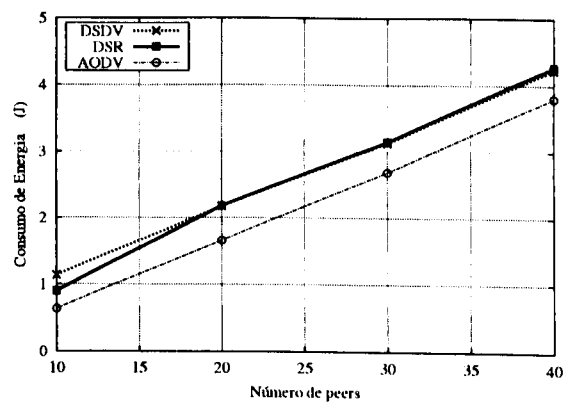
A Figura 5.7(b) apresenta os resultados de consumo de energia. Observe que o comportamento das curvas de todos os protocolos avaliados foram similares. O AODV, todavia, foi o que consumiu menos energia (aproximadamente, 0.35 J menos que os demais). Tal resultado deve-se ao fato que o AODV apresentou, além do menor número de *hops*, o menor *overhead* de roteamento.

De forma geral, o AODV foi responsável pelo melhor desempenho em termos de *overhead* de roteamento, enquanto o DSDV, como em outras vezes, foi o pior. O AODV, coerentemente com seu número de *hops* médio, também apresentou o menor atraso. O DSR, por sua vez, apresentou o maior atraso, não apenas por não prover o caminho ótimo, mas também por ter que procurar rotas sob demanda.

¹O número de *hops* só é registrado quando o *hit* é completado.



(a) Número de hops para encontrar conteúdo



(b) Consumo de energia

Figura 5.7: Variação do número de *peers*

Capítulo 6

Avaliação de Localização de Conteúdo em Redes P2P sobre MANETs

Nesta seção, apresentamos os resultados da avaliação dos protocolos P2P de localização de conteúdo sobre uma MANET em que o AODV atuou como protocolo de roteamento. Optamos pelo AODV porque integra estratégias do DSR e do DSDV (vide Seção 2.1.1) e foi o protocolo que, no geral, apresentou o melhor desempenho na avaliação do Capítulo 5. A configuração do conjunto de simulações para essa avaliação é descrita a seguir.

6.1 Simulação

As propriedades de avaliação dos protocolos P2P foram as seguintes:

- Carga da rede
- Tamanho da rede
- Erro do canal
- Mobilidade
- Dinâmica da rede

Assim como na avaliação anterior, variamos um ou mais parâmetros para atingir tais propriedades. Para essa sequência de simulações, além dos parâmetros descritos na Seção 4.1, utilizamos o seguinte padrão de configuração ¹. Rede composta de 50 nós, todos eles execu-

¹Note-se que o fato de avaliarmos diferentes propriedades e o fato de ajustarmos as configurações nas diferentes avaliações (Capítulos 5 e 6) não acarretam efeitos colaterais. Pelo contrário, são avaliações distintas e é desejável que as propriedades avaliadas também o sejam. Além disso, os protocolos que estão sendo avaliados estão sempre sujeitos aos mesmos contextos, o que torna a avaliação justa.

tando uma instância da aplicação P2P. O tempo de repouso e a velocidade máxima de cada nó de 0.1 s e 1.0 m/s, respectivamente.

Para os protocolos P2P, em especial, as seguintes configurações foram usadas. Os *peers* do Gnutella tiveram no máximo 4 vizinhos (vide Apêndice do porque dessa escolha) e o TTL das mensagens foi de 4. O Chord utilizou uma função *hash* de 10 bits e as tabelas *finger* eram atualizadas a cada 5 s. As mensagens de ambos os protocolos tinham o tamanho fixo de 64 bytes.

Nesta avaliação especificamente, não simulamos transferência de conteúdo, visto que seria feito da mesma forma para os dois protocolos P2P comparados. Desta forma, focamos desde o disparo de uma requisição, até sua localização e envio de resposta ao nó requerente.

Assim como na prévia avaliação, cada simulação foi executada 33 vezes com diferentes sementes aleatórias e os resultados representam a média das execuções. Todavia, devido a maior disponibilidade de recursos computacionais, cada simulação agora durou 500 s.

6.2 Métricas

A seguir descrevemos algumas das principais métricas consideradas durante a avaliação.

- **Taxa de** : o percentual de requisições atendidas com sucesso pela rede P2P.
- **Atraso:** o atraso percebido pelo usuário ao requerer conteúdo. Ele inclui o tempo de transmissão, localização e envio de resposta a uma requisição.
- **Energia por** : percentual de energia consumida por um 1% do total de *hits*. Essa métrica indica a eficiência da busca em termos de energia.
- **Consumo de energia:** consumo total de energia da rede.
- **Mensagens enviadas:** número total de mensagens P2P enviadas durante a simulação.

6.3 Carga da Rede

Analisamos o efeito da carga da rede sobre o desempenho de ambos os protocolos P2P. Para tal, variamos o número de arquivos distintos na rede e o número de requisições efetuadas como um todo. Os resultados obtidos são apresentados nas Figuras 6.1, 6.2, 6.3 e 6.4.

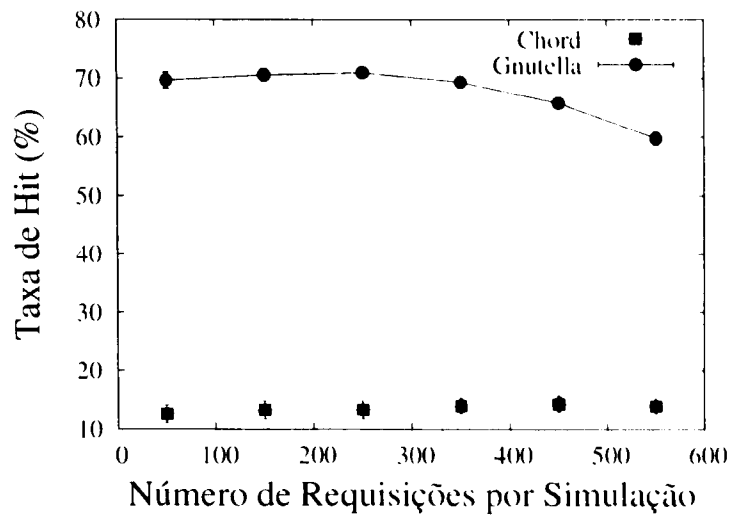


Figura 6.1: Taxa de *hit*

A Figuras 6.1, 6.2, 6.3 e 6.4 apresentam os resultados em função do número total de requisições efetuadas ao longo da simulação.

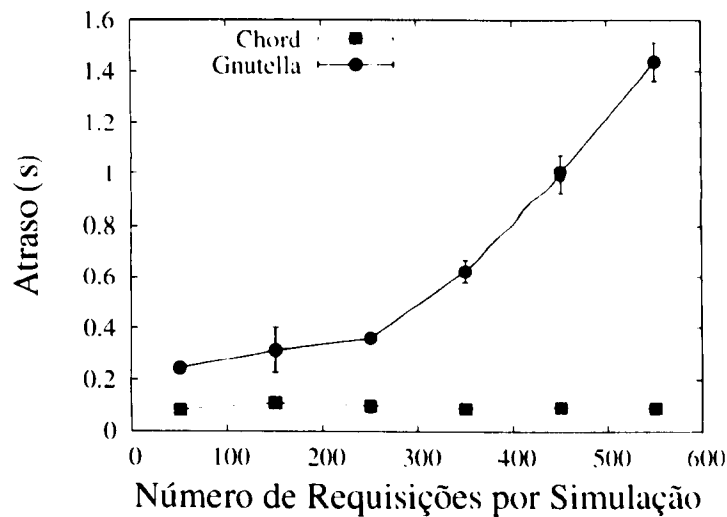


Figura 6.2: Atraso

Como pode ser observado na Figura 6.1, o Gnutella apresenta maiores taxas de *hit* (entre 60% e 70%, aproximadamente) do que o Chord (entre 10% e 20%, aproximadamente). Essa diferença deve-se a redundância de mensagens do Gnutella, em que cada *peer* redireciona uma requisição a toda sua lista de vizinhos. O Chord, por outro lado, depende apenas de uma única cópia da requisição, a qual pode ser perdida no meio não confiável proporcionado pelos enlaces sem fio. Contudo, o custo do bom resultado do Gnutella é alto tanto em termos de atraso, como em *overhead* de mensagens (Figuras 6.2 e 6.3, respectivamente). Para sermos

precisos, quando comparado com o Chord. Gnutella acarretou em atrasos de 200% até 1570% maiores e envios de mensagens de 111% até 851% maiores.

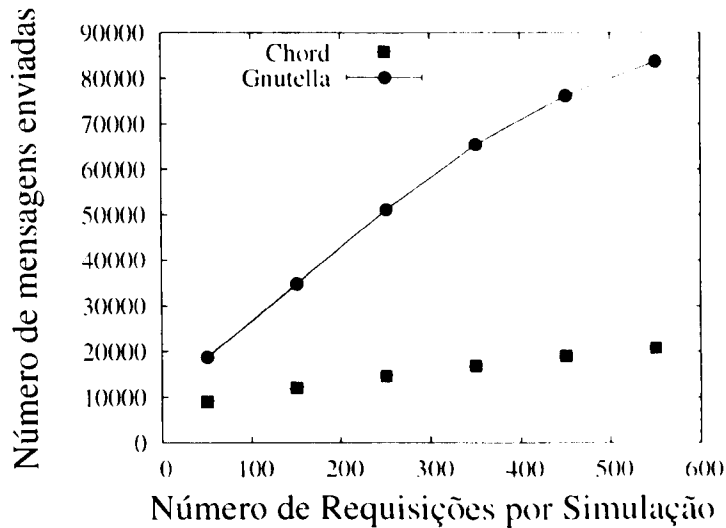


Figura 6.3: Número de mensagens enviadas

O Gnutella apresentou o maior consumo total de energia (Figura 6.4). Paradoxalmente, ele apresentou o menor consumo por *hit*. Tal resultado deveu-se ao a energia que o Chord gastou para manter consistentes informações sobre os estado do *Chord ring*.

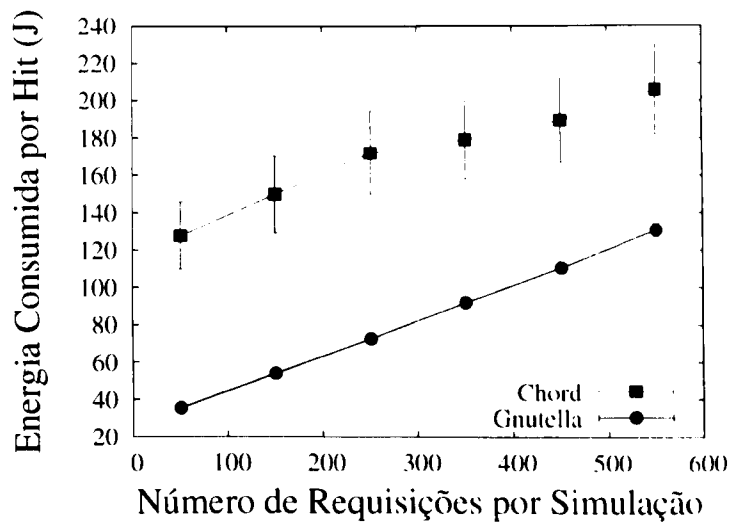


Figura 6.4: Energia por *hit*

Finalmente, embora o Chord tenha apresentado baixas taxas de *hit* (isto é, um pouco maior que 10% em todos os cenário), é importante salientar que o protocolo apresentou melhor escalabilidade e sofreu menor impacto da variação de carga.

6.4 Tamanho da Rede

Também avaliamos o impacto do número de *peers* em cada protocolo. A fim de mantermos a densidade da rede fixa (1.0 peer/m^2), ajustamos o tamanho da área de acordo com o tamanho da rede (número de *peers*). Assim como nas demais propriedades, cada *peer* foi executado sobre um nó, distinto, da MANET. Os resultados obtidos são apresentados nas Figuras 6.5, 6.6, 6.7 e 6.8.

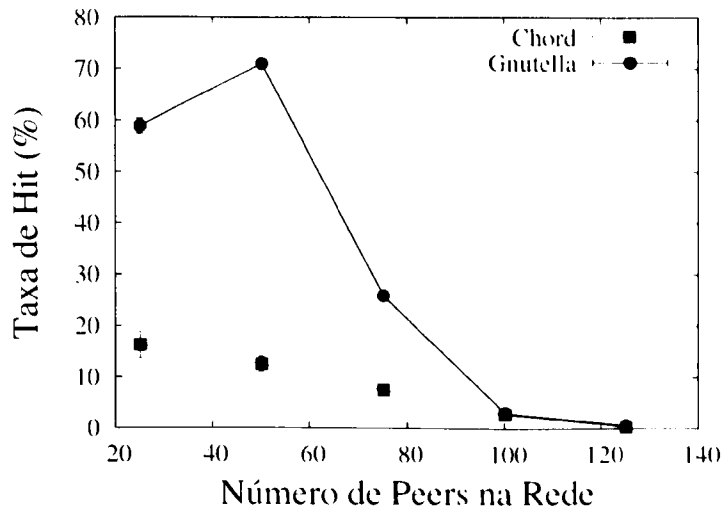


Figura 6.5: Taxa de *hit*

Para uma rede com 100 *peer*, Gnutella obteve a maior taxa de *hit* — 370%, 580%, e novamente 370% para 25, 50 e 75 *peers*, respectivamente (Figura 6.5).

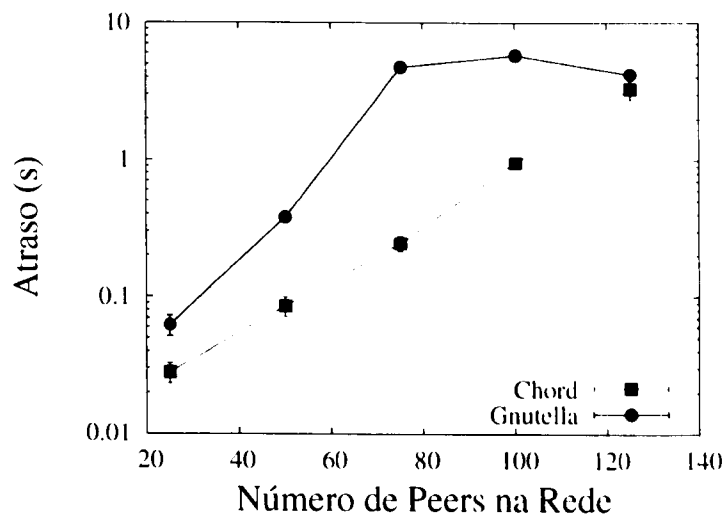


Figura 6.6: Atraso

Por outro lado, se levarmos em conta tempo de resposta e de mensagens enviadas, o protocolo Chord foi o que saiu-se melhor. Ele apresentou atraso 77% menor e enviou de 25% a 70% menos mensagens (Figuras 6.6 e 6.7, respectivamente).

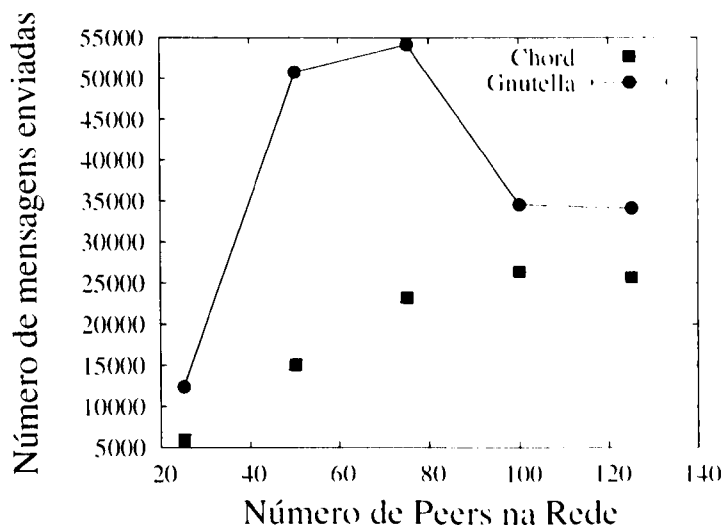


Figura 6.7: Número de mensagens enviadas

De maneira geral, é importante notar que ambos os protocolos foram muito sensíveis à variação do tamanho da rede e apresentaram os melhores desempenhos em redes de tamanho médio (de 20 a 50 *peers*). Outra coisa é o consumo de energia por *hit*, que foi similar para os dois protocolos (Figura 6.8). Finalmente, nem Chord nem Gnutella lidaram bem com o crescimento da rede. No Gnutella, em especial, a utilização de TTL fez com que a probabilidade de localização de um conteúdo diminuísse à medida que a rede crescia.

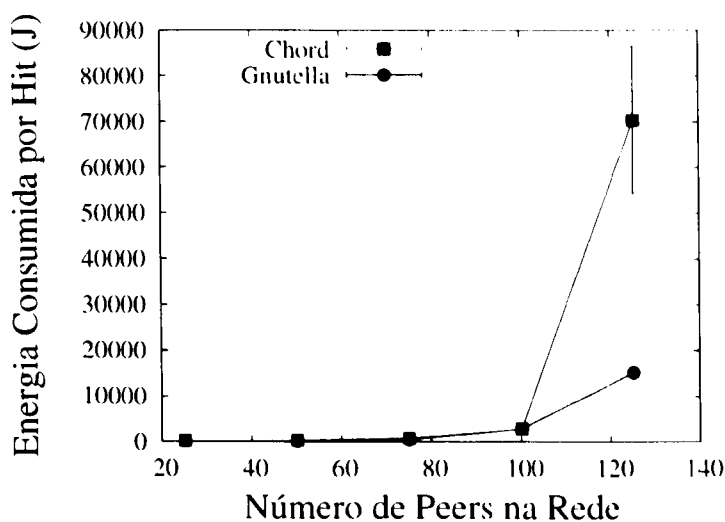


Figura 6.8: Energia por *hit*

6.5 Erro do Canal

Redes sem fio comumente apresentam taxas de erro bem maiores do que as redes cabeadas convencionais, o que leva a um número considerável de pacotes descartados. A qualidade do enlace é altamente dependente do ambiente e da localização do nó, variando significativamente de uma região para outra [49, 51]. Nas Figuras 6.9, 6.10, 6.11 e 6.12 estão apresentados resultados em função da taxa de erro do canal.

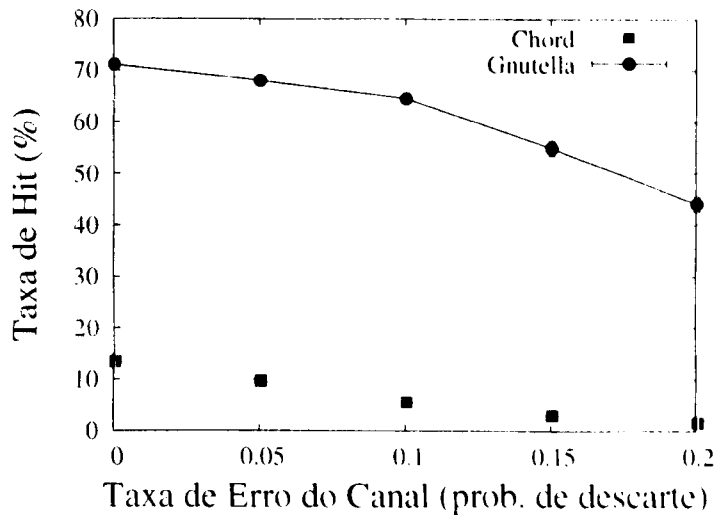


Figura 6.9: Taxa de *hit*

Como mostra a Figura 6.9, Chord apresentou taxas de *hit* menores que 10%. Esse resultado deveu-se a dependência do protocolo à confiabilidade do meio, visto que não possui mensagens redundantes. O Gnutella, por outro lado, foi capaz de mostrar bom desempenho até mesmo em ambientes cujas taxas de erros foram medianas, isto é, 0.05 e 0.1 %. Contudo, nem mesmo a redundância de mensagens do Gnutella foi capaz de mitigar satisfatoriamente descartes em cenários sob alta taxa de erro. A razão disso é que nem todas as mensagens do protocolo não-estruturado possui réplicas. Mensagens de controle *ping* e *pong*, por exemplo, não são redundantes, o que torna o Gnutella também vulnerável a taxas de erro.

Os resultados para tempo de resposta, número de mensagens enviadas e energia por *hit* são mostrados nas Figuras 6.10, 6.11 e 6.12, respectivamente.

O tempo de resposta do Gnutella apresentou um aumento quase exponencial (600%) com o aumento do erro do canal (Figura 6.10). O Chord, entretanto, mostrou-se mais estável e variou seu tempo de resposta no máximo 12% (Figura 6.10). Ele também envia cerca de 72% menos mensagens que o Gnutella (Figura 6.11).

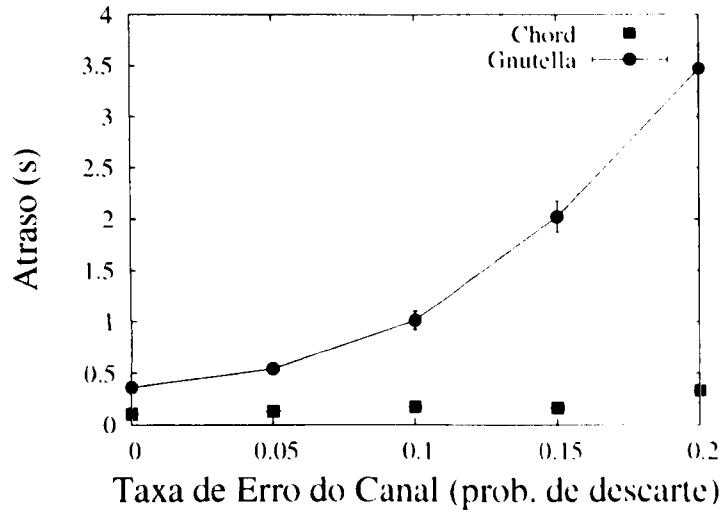


Figura 6.10: Atraso

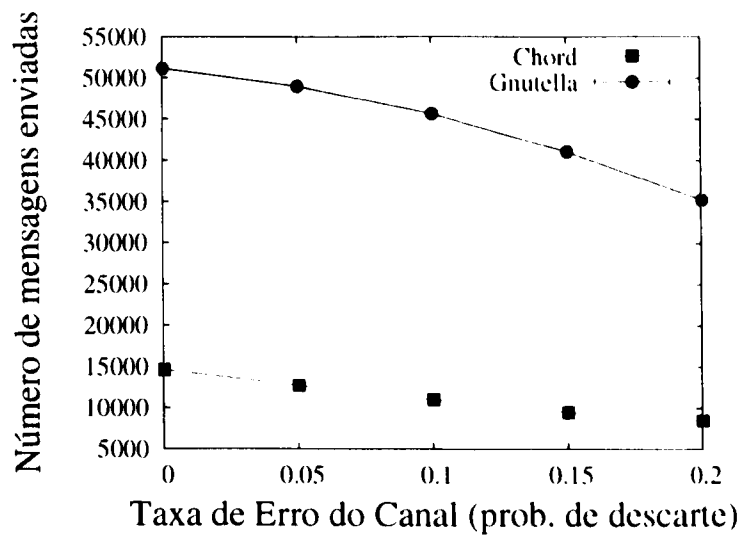


Figura 6.11: Número de mensagens enviadas

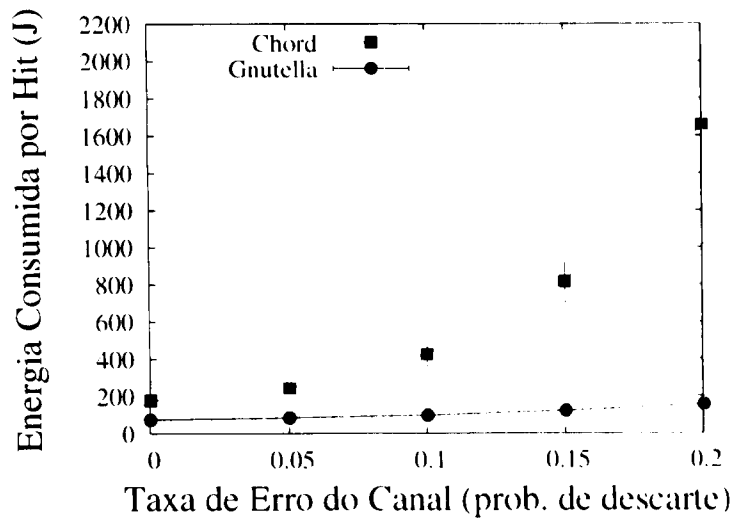


Figura 6.12: Energia por *hit*

Novamente, a energia consumida por *hit* do Gnutella foi a menor entre os protocolos. Mais exatamente, quando a taxa de erro foi 20%, o consumo de energia por *hit* do Gnutella foi, aproximadamente, $8\times$ menor do que o do Chord. Essa mesma métrica apresentou crescimento exponencial para o Chord. Como menos requisições foram completadas, o *overhead* para manter o *Chord ring* o que dominou o consumo de energia e, por sua vez, o consumo de energia por *hit* foi incrementado. Isso é sustentado pela Figura 6.13, que mostra que o Chord ainda consumiu menos energia por nó que o Gnutella, mesmo em cenários em que o Chord consome mais energia por *hit*.

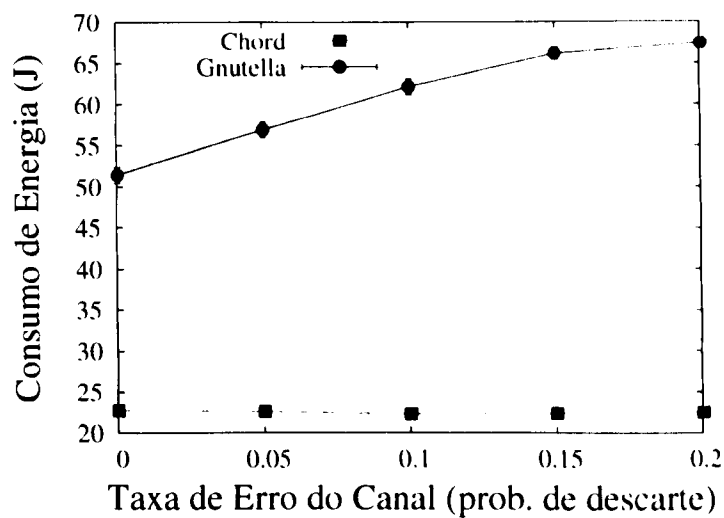


Figura 6.13: Energia consumida pela rede

6.6 Mobilidade

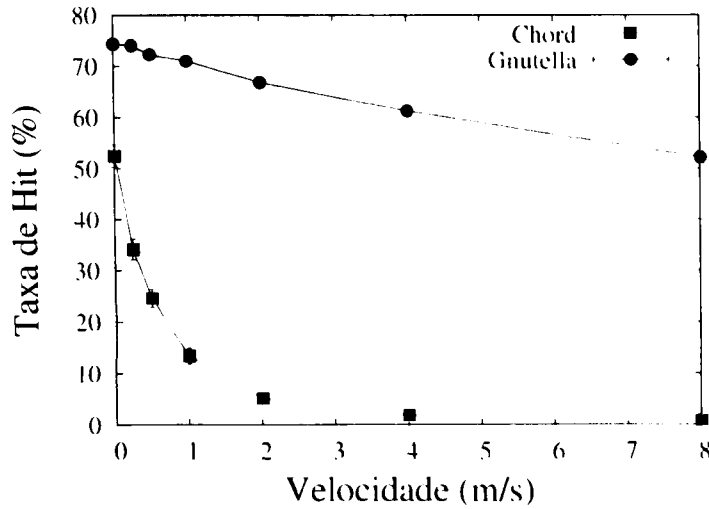


Figura 6.14: Taxa de *hit*

Apesar de redes P2P serem tolerantes a falhas, elas não foram projetadas para executar em ambientes móveis, em que desconexões ocorrem com frequência. A seguir, avaliamos o impacto de mudanças de topologia, devido à mobilidade, nos protocolos P2P. As Figuras 6.14, 6.15, 6.16, 6.17, 6.19 e 6.18 apresentam os resultados em função das seguintes velocidades de nós: 0, 0.25, 0.5, 1, 2, 4 e 8 m/s.

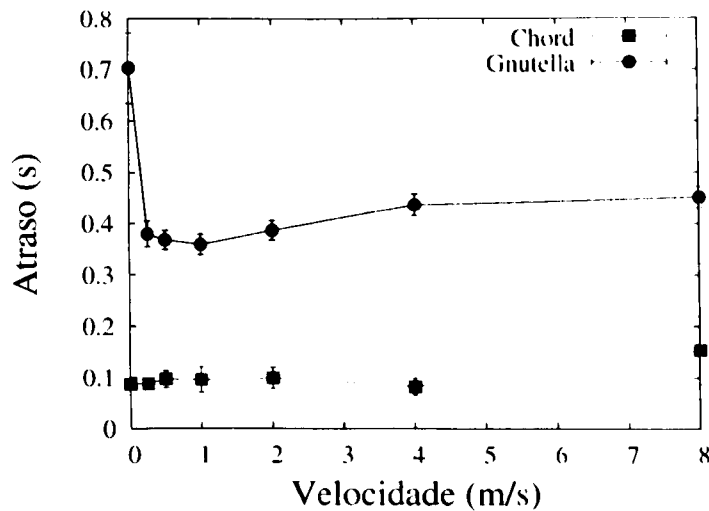


Figura 6.15: Atraso

Em cenários de baixa mobilidade, o Gnutella foi o que transmitiu o maior número de mensagens (Figura 6.16) e, por conseguinte, seu tempo de resposta foi também maior (Figura 6.15).

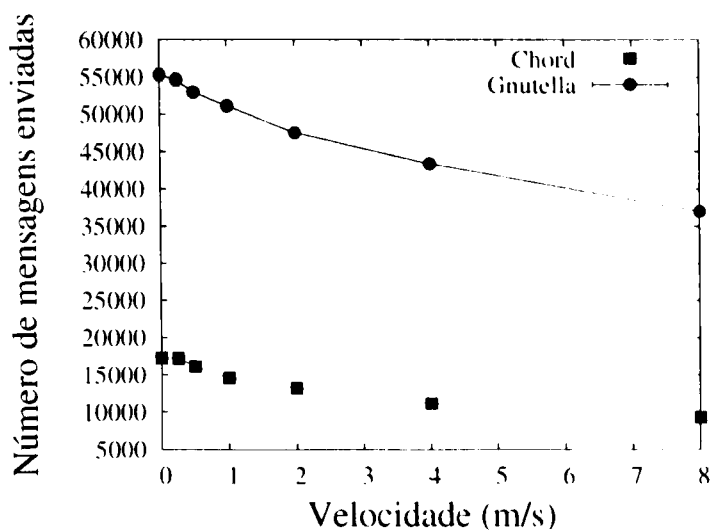


Figura 6.16: Número de mensagens enviadas

Pela Figura 6.15, parece que a mobilidade é benéfica ao Gnutella, uma vez que menos pacotes foram corretamente entregues e, então, um menor tráfego foi imposto a rede. Contudo, sob alta mobilidade, ambos os protocolos sofreram degradação. Particularmente, houve um aumento no tempo de resposta e um decréscimo na taxa de *hit*. Durante a avaliação dessa propriedade, ao contrário das demais, o Chord foi o menos estável dos protocolos e apresentou alta variação na maior parte das métricas. À medida que a velocidade foi acrescida de 0 a 2 m/s, a taxa de *hit* do Chord (Figura 6.14) foi decrescida de 50% para 5% e, continuando esse crescimento, a taxa chegou próxima de zero. O Gnutella, por sua vez, foi menos afetado pela mobilidade e sua taxa de *hit* permaneceu acima de 60% durante toda a gama de simulações.

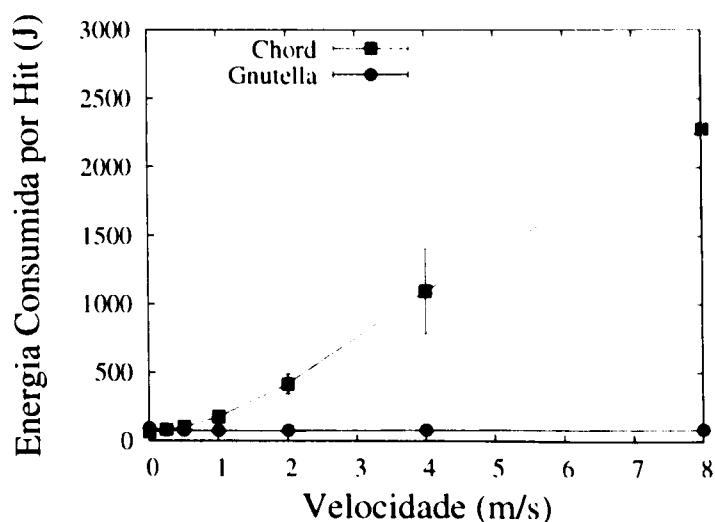


Figura 6.17: Energia por *hit*

A Figura 6.18 mostra o consumo médio de um nó durante toda a simulação. Curiosamente, o consumo de energia decresceu à medida que a mobilidade aumentou. Em relação a energia por *hit* (Figura 6.17), o Gnutella se manteve estável, enquanto o Chord aumentou o consumo e atingiu o pico de 2300 J, aproximadamente, a 8 m/s.

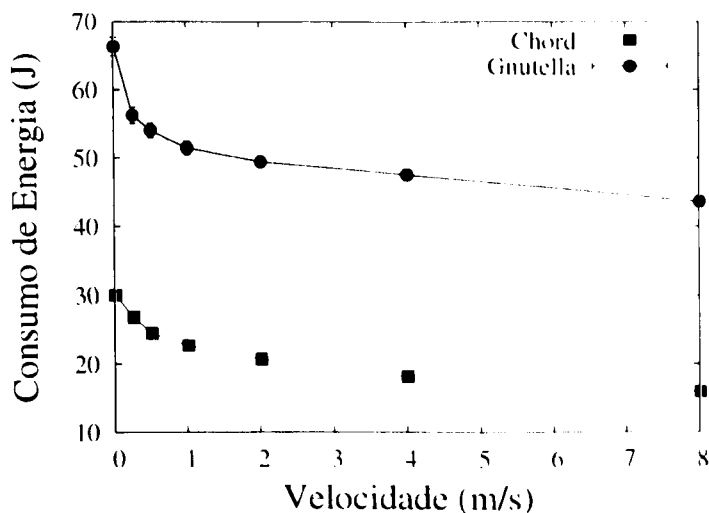


Figura 6.18: Energia consumida pela rede

Finalmente, note-se que quanto maior a mobilidade, menor o número de mensagens descartadas durante a simulação (Figura 6.19, eixo Y em escala logarítmica). Esses descartes foram causados por colisões e/ou vizinhos que estavam fora de alcance. Para velocidades acima de 4 m/s, no entanto, o número de mensagens descartadas parece se estabilizar em torno de 500, para o Chord, e 10.000, para o Gnutella.

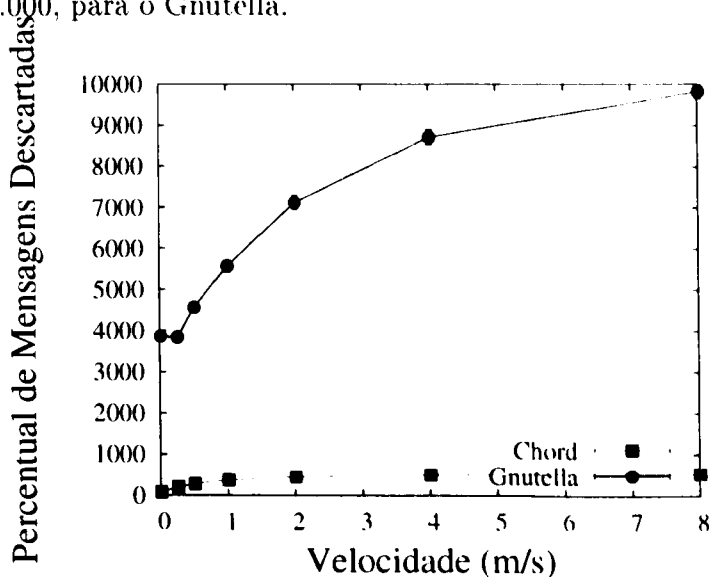


Figura 6.19: Número total de mensagens descartadas durante a simulação

6.7 Dinâmica da Rede

A seguir, apresentamos os resultados da avaliação de dinâmica da rede, isto é, os resultados de como a entrada e saída de *peers* impacta na rede. *A priori*, sabemos que o Gnutella se auto-organiza mais rapidamente, visto que o Chord, ao contrário, demanda dos *peers* várias operações para que possam entrar e/ou sair da rede.

Para a avaliação, variamos o percentual de *peers* deixando a rede de 50% a 0%. Inicialmente, variamos o número de *peers* dinâmicos da rede — *peers* que deixavam a rede em algum momento da simulação — em cenários com mobilidades. Nesses cenários, os resultados relativos ao Chord foram negativos. Decidimos, então, repetir as simulações para uma rede estacionária. Além disso, consideramos que sempre que um *peer* saía da rede P2P, o nó da MANET sobre o qual estava executando também deixava a MANET. Os resultados são apresentados nas Figuras 6.20, 6.21, 6.22 e 6.23.

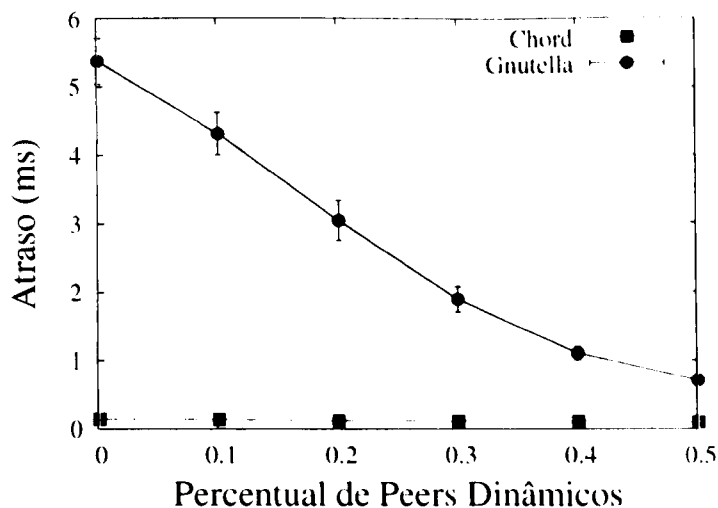


Figura 6.20: Atraso

Quando o número de *peers* dinâmicos diminuiu, a disponibilidade dos *peers* aumentou e a rede Gnutella foi saturada com requisições. Isso fica visível no tempo de resposta (Figura 6.20) e no número de mensagens enviadas (Figura 6.21), as quais são inversamente proporcionais ao número de *peers* dinâmicos.

O Chord não apresentou bom desempenho para topologias muito dinâmicas, mas foi o que atuou melhor para até 20% de *peers* dinâmicos. Até esse ponto, além de atingir taxas de *hit* bem próximas às do Gnutella, ele ainda obteve tempo de resposta menor (Figura 6.20) e menor consumo de energia por *hit* (Figura 6.22). Isso porque quando a rede não está saturada, o

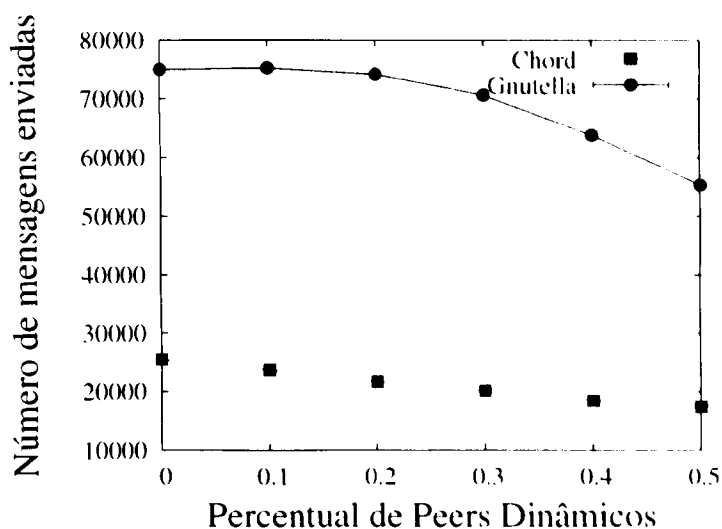


Figura 6.21: Número de mensagens enviadas

aumento do tráfego devido a um número maior de *peers* na rede Chord é mais que compensada pelo aumento da taxa de *hit*.

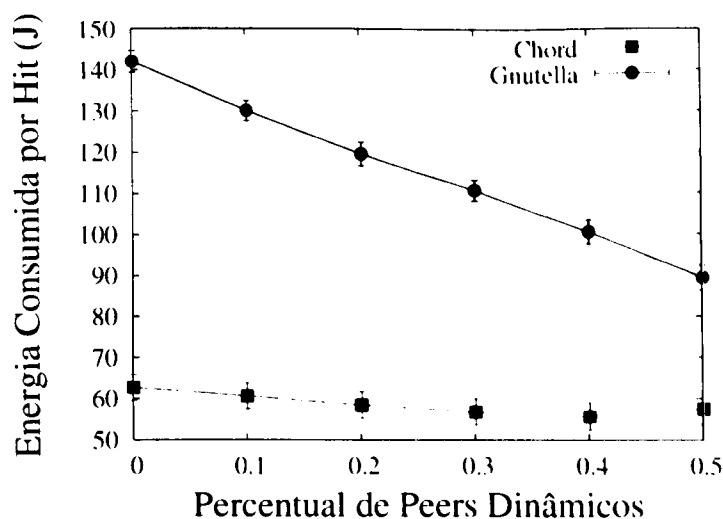


Figura 6.22: Energia por *hit*

Note-se que, embora a maioria das aplicações possua alto índice de desconexões e de rotatividade de *peers*, isso não é uma regra. Existem outras aplicações que são executadas em ambientes de maior confiabilidade e por um número restrito de *peers*, e, por conseguinte, são mais “bem comportadas”. A análise da propriedade de dinâmica da rede mostrou que em contextos menos dinâmicos, o Chord pode apresentar menor atraso e consumo de energia que o Gnutella.

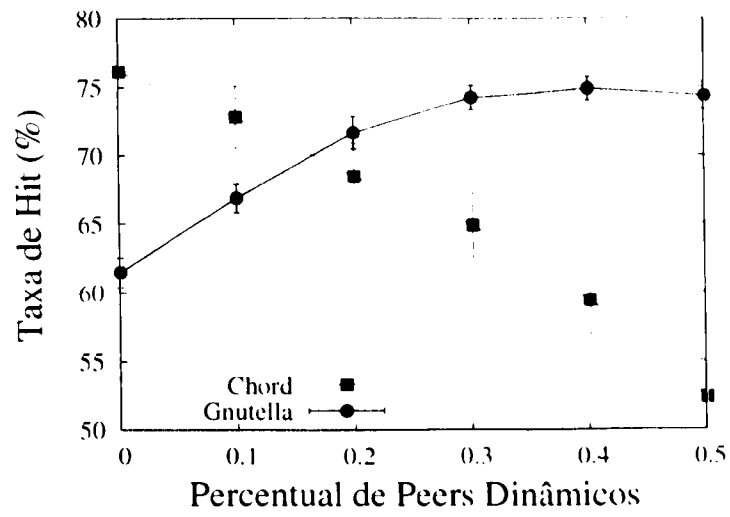


Figura 6.23: Taxa de *hit*

Capítulo 7

Discussão dos Resultados

Com relação aos resultados da avaliação de protocolos de roteamento, notou-se que o desempenho de um protocolo dependeu do cenário em que foi executado. Em outras palavras, não houve um protocolo que se sobressaiu em todos os cenários, mas sim protocolos que se sobressaíram em cenários específicos ou que apresentaram melhor desempenho levando-se em conta uma determinada métrica. Mesmo assim, em diversos casos, a variação de um parâmetro causou mudanças e protocolos que apresentavam o melhor desempenho passaram a apresentar o pior.

O DSDV foi o que apresentou maior *overhead* de roteamento e por isso, algumas vezes, foi o que gastou mais energia. Todavia, seu *overhead* não o impediu de apresentar o melhor desempenho quando o tamanho dos arquivos médio foi configurado para 1.000K (Seção 5.3) e a melhor estabilidade quando variamos o número de requisições por nó (Seção 5.3).

O DSR em diversos cenários foi prejudicado por sua estratégia de construir toda a rota no nó fonte. Tal estratégia criou rotas muito extensas e, embora tenha produzido o menor *overhead* de roteamento no geral, houve cenários em que seu consumo de energia foi alto. De positivo do DSR podemos citar a conectividade de vizinhos quando variamos o tempo de repouso (Seção 5.4) e taxa de entrega quando variamos o raio de alcance (Seção 5.5).

O AODV foi o protocolo que no geral apresentou o melhor desempenho. Isso pôde ser visto tanto em seu consumo de energia, quando variamos o número de requisições por nó (Seção 5.3), como na entrega de mensagens de transferência de arquivos, quando variamos o tamanho dos arquivos (Seção 5.3). Além disso, na maioria das propriedades foi ele que apresentou o melhor caminho para o conteúdo desejado, isto é, o caminho mais curto. Finalmente, note-se que em nenhum dos cenários o AODV apresentou, sempre, o pior resultado dentre os três protocolos.

A respeito da avaliação de técnicas P2P de localização de conteúdo, novamente, os resulta-

dos mostraram que o ambiente deve ser considerado antes de se optar pelo emprego de alguma estratégia.

A estratégia estruturada, através do Chord, mostrou-se pouco viável em ambientes de topologia muito dinâmica e/ou de alta taxa de erro. O mau desempenho deveu-se ao consumo de largura banda pelas mensagens de controle, freqüentes em redes P2P estruturadas, e a ausência de redundância de pacotes (no Chord, a localização de um conteúdo depende de uma única instância da mensagem de requisição). Por outro lado, em cenários estáticos com alta confiabilidade de canal, o Chord desempenhou-se melhor que o Gnutella, e produziu maiores taxas de *hit* e menor consumo de energia (Seção 6.7) – note-se, entretanto, que cenários como esses são a exceção, e não a regra, em redes P2P sobre MANETs.

A estratégia não-estruturada, por meio do Gnutella, mostrou-se a mais adequada (maior taxa de *hit*, consumo de energia mais eficiente etc.) na maioria dos cenários. O bom desempenho deveu-se, principalmente, ao envio de requisições por *flooding*, que duplica mensagens e atenua descartes causados por falta de rota e erro do canal.

7.1 Elaboração de protocolos para Redes P2P sobre MANETs

Os resultados deste trabalho, além de aferirem as soluções já existentes, dão uma idéia de como os projetos de protocolos desenvolvidos especificamente para redes P2P sobre MANETs devem ser guiados.

Primeiramente, os resultados indicaram que não existirá uma panacéia e que a elaboração de protocolos deverá ser guiada pelas idiossincrasias da aplicação e do ambiente em que a rede será executada.

Projetos de protocolos de roteamento *ad hoc* devem conter mecanismos para lidar com a dinâmica da topologia da rede. Em outras palavras, protocolos próativos devem ser revistos de forma a diminuir o intervalo entre as atualizações, tornando-as mais freqüentes, e protocolos reativos devem adequar a busca de rotas ao novo contexto (valorizando o roteamento *hop a hop* e preterindo o roteamento na fonte – *source routing* –, por exemplo).

Já projetos relacionados a protocolos P2P de localização de conteúdo devem levar em conta o canal sem fio e inserir nos protocolos mecanismos de redundância e/ou garantia de entrega de pacotes. O desafio é que, concomitantemente, a preocupação com a baixa largura de banda

dos enlaces deve ser mantida.

Finalmente, note-se que projetos podem elaborar de uma só vez protocolos P2P e de roteamento *ad hoc* de forma que um considere as funcionalidades do outro e vice-versa. Por exemplo, um protocolo P2P que será combinado com protocolos de roteamento que possuem mecanismos de garantia de entrega não precisam se preocupar com a redundância de mensagens e podem ter o foco apenas na otimização de busca e armazenagem de conteúdo. Similarmente, pode-se optar pela construção de um só protocolo que atue nas duas redes, isto é, um protocolo *cross-layer*.

Capítulo 8

Conclusões e Trabalhos Futuros

O avanço da computação vêm quebrando paradigmas e possibilitando novas tecnologias. Dentre tais tecnologias duas chamam especial atenção pela gama de aplicações que proporcionam e pela facilidade de serem colocadas em operação. São elas MANETs e Redes P2P. Elas não são apenas semelhantes, mas também complementares. Logo, é necessário identificar estratégias de otimizar ambientes em que elas coexistem.

Neste trabalho, contribuímos para o estado da arte ao efetuarmos as seguintes avaliações:

- Avaliação de protocolos de roteamento *ad hoc* sob uma rede P2P.
- Avaliação de protocolos P2P de localização de conteúdo sobre uma MANET.

Com relação aos resultados da avaliação de protocolos de roteamento, notou-se que o desempenho de um protocolo dependeu do cenário em que foi executado. Em outras palavras, não houve um protocolo que se sobressaiu em todos os cenários, mas sim protocolos que se sobressaíram em cenários específicos ou que apresentaram melhor desempenho levando-se em conta uma determinada métrica. Mesmo assim, em diversos casos, a variação de um parâmetro causou mudanças e protocolos que apresentavam o melhor desempenho, passaram a apresentar o pior.

A respeito da avaliação de técnicas P2P de localização de conteúdo, novamente, os resultados mostraram que o ambiente deve ser considerado antes de se optar pelo emprego de alguma estratégia.

De maneira geral, acreditamos que protocolos P2P para MANETs devem conter mecanismos de redundância para atenuar o efeito de perda de pacotes e os protocolos de roteamento estratégias para lidar com a dinâmica da rede (roteamento *hop a hop*, atualização de tabelas mais frequentes etc.).

Em função do tema abordado neste trabalho, são várias as possibilidades de trabalhos futuros.

A primeira delas poderia ser exatamente um melhoramento do trabalho em questão. Isto é, do ponto de vista de roteamento *ad hoc*, poderia-se avaliar outros protocolos que empregam outras estratégias – do tipo roteamento por zona, roteamento hierárquico e protocolos com suporte a *multicast*. Também, do ponto de vista de localização de conteúdo, poderia-se aferir outros protocolos estruturados ou protocolos que oferecem outras propriedade (por exemplo, o Freenet que proporciona privacidade). Além disso, assim como analisamos o Gnutella e descobrimos o tamanho ideal de lista de vizinhos, um outro trabalho seria focar o Chord exclusivamente, identificando quais de suas propriedades poderiam ser ajustadas para um melhor desempenho do mesmo em uma MANET.

Outra possibilidade que fica clara após esse trabalho seria analisar o grau de redundância de mensagens a fim de se identificar o grau ideal. Veja que seriam necessárias não só duplicatas de mensagens de requisição, mas também de mensagens de controle. O erro do canal também deveria ser considerado.

Uma outra possibilidade seriam propostas de protocolos P2P *ad hoc* voltados exclusivamente para MANETs. *Ad hoc*, porque poderiam focar a eficiência de um propriedade em particular sobre uma MANET. Por exemplo, o desenvolvimento de um protocolo P2P que leva em conta o padrão de comunicação sem fio das MANETs e oferece segurança na descoberta e compartilhamento de conteúdo.

Uma rede de sensor sem fio (RSSF) é um tipo específico de rede *ad hoc* em que os nós em geral permanecem estáticos [52]. Devido a gama de aplicações que RSSFs oferecem, sem dúvida, uma vertente a ser investigada seriam propostas de redes P2P para essas redes. A nossa opinião é que redes P2P seriam especialmente úteis em RSSFs centrada em dados [53]. Essas redes, ao contrário das RSSFs convencionais, armazenam dados nos próprios nós sensores.

Finalmente, um ramo de sistemas P2P sobre MANETs que ainda está à espera de ser pesquisado é o de modelos analíticos. Seja para construir a vizinhança lógica, seja para armazenar conteúdo, até onde sabemos, não existem modelos que traduzem esses sistemas sobrepostos.

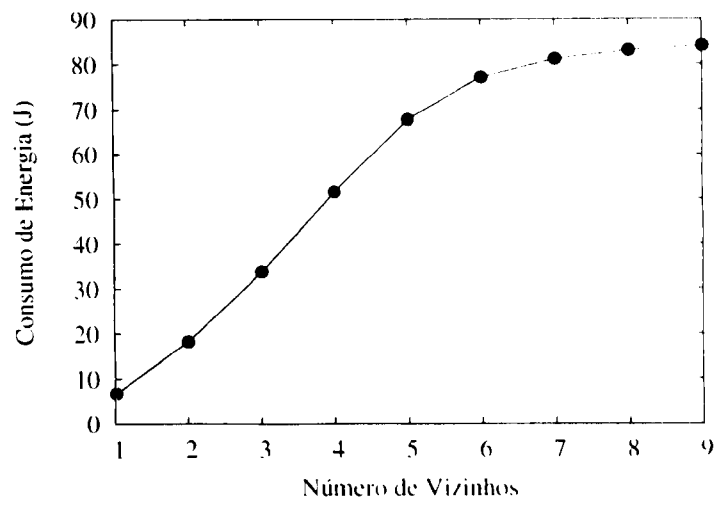
Apêndice A

Número Máximo de Vizinhos Gnutella

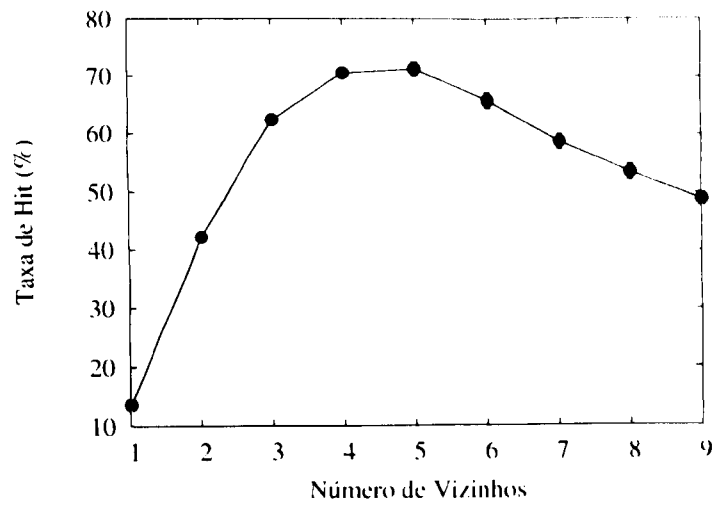
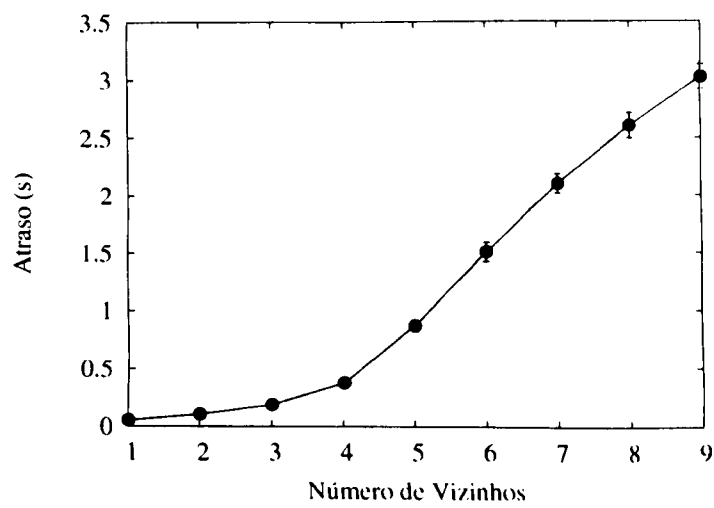
No protocolo Gnutella, *peers* enviam uma cópia de cada requisição para todos os seus vizinhos. Essa estratégia resulta em um aumento das mensagens de requisição, o que pode levar a mais *hits*. Por outro lado, isso acarreta em maior tráfego, atraso e consumo de energia, que, paradoxalmente, pode levar ao decréscimo de *hits*. Com isso, caracterizamos um compromisso. Antes de compararmos o protocolo Gnutella com o protocolo Chord (Capítulo 6), analisamos esse compromisso e configuramos o Gnutella de acordo com essa análise.

Para alcançarmos o melhor compromisso, variamos o número máximo de vizinhos que um *peer* pode ter na rede Gnutella e levamos em consideração a taxa de *hit*, a energia consumida e o atraso, cujos resultados são apresentados nas Figuras A.1(b) , A.1(a), e A.1(c), respectivamente. A configuração da simulação foi a mesma descrita na Seção 6.1.

Note-se que os resultados mostraram que as maiores taxas de *hit* foram alcançadas para 4 e 5 vizinhos. Também, note-se que para 5 ou mais vizinhos a energia consumida e o atraso cresceram exponencialmente, indicando que a rede começou a saturar. Com isso, o melhor custo-benefício parece ser atingido quando o número de vizinhos máximo é 4.



(a) Consumo de Energia

(b) Taxa de *hit*

(c) Atraso

Bibliografia

- [1] Jiejun Kong and Mario Gerla. Providing real-time security support for multi-level ad-hoc networks. In *Proceedings of the IEEE Military Communications Conference (MILCOM'02)*, 2002.
- [2] Lidong Zhou and Zygmunt J. Haas. Securing ad hoc networks. *IEEE Network*, 13(6):24–30, November/December 1999. Special Issue on Network Security.
- [3] Joseph Borg. A comparative study of ad hoc & peer to peer networks. Master's thesis, University College London, 2003.
- [4] Z. J. Haas, J. Deng, B. Liang, P. Papadimitratos, and S. Sajama. Wireless ad hoc networks. In John G. Proakis, editor, *Wiley Encyclopedia of Telecommunications*. John Wiley & Sons, 2002.
- [5] Domenico Talia and Paolo Trunfio. Toward a synergy between P2P and grids. *IEEE Internet Computing*, 7(4):94–95, 2003.
- [6] Josh Broch, David A. Maltz, David B. Johnson, Yih-Chun Hu, and Jorjeta Jetcheva. A performance comparison of multi-hop wireless ad hoc network routing protocols. In *Proceedings of the 4th annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking*, pages 85–97, Dallas, Texas, United States, 1998. ACM Press.
- [7] Samir Ranjan Das, Charles E. Perkins, and Elizabeth M. Royer. Performance comparison of two on-demand routing protocols for ad hoc networks. In *IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM'00)*, pages 3–12, Tel Aviv, Israel, March 2000.
- [8] Hong Jiang and J.J. Garcia-Luna-Aceves. Performance comparison of three routing protocols for ad hoc networks. In *Proceedings of the Tenth International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN'01)*, pages 547–554, February 2001.

- [9] Per Johansson, Tony Larsson, Nicklas Hedman, Bartosz Mielczarek, and Mikael De-germark. Scenario-based performance analysis of routing protocols for mobile ad-hoc networks. In *Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*, pages 195–206. ACM Press, 1999.
- [10] Zihui Ge, Daniel R. Figueiredo, Sharad Jaiswal, Jim Kurose, and Don Towsley. Modeling peer-peer file sharing systems. In *Proceedings of the 22nd IEEE Conference on Computer Communications*, 2003.
- [11] Dimitrios Tsoumakos and Nick Roussopoulos. A comparison of peer-to-peer search methods. In *Sixth International Workshop on the Web and Databases*, pages 61–66, 2003.
- [12] Tsungnan Lin and Hsinping Wang. Search performance analysis in peer-to-peer networks. In *IEEE 3rd International Conference on Peer-to-Peer Computing (P2P'03)*, pages 204–205. IEEE Computer Society, 2003.
- [13] Beverly Yang and Hector Garcia-Molina. Improving search in peer-to-peer networks. In *22nd International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS'02)*, pages 5–14. IEEE Computer Society, 2002.
- [14] David B. Johnson and David A. Maltz. Dynamic source routing in ad hoc wireless networks. In *Ad Hoc Networking edited by Charles E. Perkins*, pages 139–172. Addison-Wesley, 2001. Also appeared in *IEEE Computer Communications*.
- [15] Charles E. Perkins and Pravin Bhagwat. Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing (DSDV) for mobile computers. In *ACM Conference on Communications Architectures (SIGCOMM'94) , Protocols and Applications*, pages 234–244, London, United Kingdom, 1994. ACM Press.
- [16] Charles E. Perkins and Elizabeth M. Royer. Ad hoc on-demand distance vector routing. In *Proceedings of the 2nd IEEE Workshop on Mobile Computing System and Applications*, pages 90–100, New Orleans, LA, February 1999.
- [17] Ion Stoica, Robert Morris, David Liben-Nowell, David R. Karger, M. F. Kaashoek, Frank Dabek, and Hari Balakrishnan. Chord: a scalable peer-to-peer lookup protocol for internet applications. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 11(1):17–32, 2003. Also appeared in *Proceedings of the ACM SIGCOMM '01 Conference*.

- [18] Vincent D. Park and M. Scott Corson. A highly adaptive distributed routing algorithm for mobile wireless networks. In *Conference of the IEEE Communications Society (INFOCOM'97)*, pages 1405–1413, 1997.
- [19] Zygmunt J. Haas and Marc R. Pearlman. Zrp: a hybrid framework for routing in ad hoc networks. pages 221–253, 2001.
- [20] Antony Rowstron and Peter Druschel. Storage management and caching in PAST, a large-scale, persistent peer-to-peer storage utility. In *18th ACM Symposium on Operating Systems Principles*, pages 188–201, 2001.
- [21] Antony Rowstron and Peter Druschel. Pastry: Scalable, distributed object location and routing for large-scale peer-to-peer systems. In *IFIP/ACM International Conference on Distributed Systems Platforms (Middleware)*, pages 329–350, 2001.
- [22] Sylvia Ratnasamy, Paul Francis, Mark Handley, Richard Karp, and Scott Shenker. A scalable content addressable network. In *Proceedings of the ACM SIGCOMM '01 Conference*, pages 161–172, San Diego, CA, August 2001.
- [23] Ben Y. Zhao, Ling Huang, Jeremy Stribling, Sean C. Rhea, Anthony D. Joseph, and John D. Kubiatowicz. Tapestry: A global-scale overlay for rapid service deployment. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 22(1):41–53, 2004.
- [24] Ian Clarke, Oskar Sandberg, Brandon Wiley, and Theodore W. Hong. Freenet: A distributed anonymous information storage and retrieval system. In *Workshop on Design Issues in Anonymity and Unobservability*, pages 46–66, 2000.
- [25] Leonardo B. Oliveira, Isabela G. Siqueira, and Antonio A. F. Loureiro. Evaluation of ad hoc routing protocols under a peer-to-peer application, 2003. Second place, Region 9.
- [26] Rüdiger Schollmeier, Ingo Gruber, and Michael Finkenzeller. Routing in peer-to-peer and mobile ad hoc networks: A comparison. In *Proceedings of International Workshop on Peer-to-Peer Computing*, Pisa, Italy, 2002. held in conjunction with IFIP Networking 2002.
- [27] G. Kortuem, J. Schneider, D. Preuit, T. G. C. Thompson, S. Fickas, and Z. Segall. When peer-to-peer comes face-to-face: Collaborative peer-to-peer computing in mobile ad hoc

- networks. In *IEEE 1st International Conference on Peer-to-Peer Computing (P2P'02)*, pages 75–91, Linkopings, Suécia, August 2001.
- [28] Gerd Kortuem. Proem: a middleware platform for mobile peer-to-peer computing. *SIG-MOBILE Mobile Computing and Communication Review*, 6(4):62–64, October 2002. Special Feature on Middleware for Mobile Computing.
- [29] Maria Papadopouli and Henning Schulzrinne. Effects of power conservation, wireless coverage and cooperation on data dissemination among mobile devices. In *2nd ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing*, pages 117–127. ACM Press, March 2001.
- [30] Maria Papadopouli and Henning Schulzrinne. A performance analysis of 7ds a peer-to-peer data dissemination and prefetching tool for mobile users. In *Advances in wired and wireless communications, IEEE Sarnoff Symposium Diges*, Ewing, USA, March 2001.
- [31] Alexander Klemm, Christoph Lindemann, and Oliver P. Waldhorst. A special-purpose peer-to-peer file sharing system for mobile ad hoc networks. In *IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference (VTC2003-Fall)*, October 2003.
- [32] Fernanda P. Franciscani, Marisa A. Vasconcelos, Rainer P. Couto, and Antonio A. F. Loureiro. Peer-to-peer over ad-hoc networks: (re)configuration algorithms. *Journal of Parallel and Distributed Computing (JPDC)*. Special Issue. To appear. Also appeared in 17th IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium 2003 (IPDPS'03).
- [33] S. Milgram. The small-world problem. *Psychology Today*, 1(1):60–67, 1967.
- [34] D.J. Watts and S. Strogatz. Collective dynamics of –small- world' networks. *Nature*, 393(6):440–442, June 1998.
- [35] Gang Ding and Bharat Bhargava. Peer-to-peer file-sharing over mobile ad hoc networks. In *2th IEEE Annual Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops*, pages 104–108, Orlando, Florida, March 2004.
- [36] Y. Charlie Hu, Saumitra M. Das, and Himabindu Pucha. Exploiting the Synergy between Peer-to-Peer and Mobile Ad Hoc Networks. In *HotOS-IX: Ninth Workshop on Hot Topics in Operating Systems*, Lihue, Kauai, Hawaii, May 18–21 2003.

- [37] Elizabeth M. Royer and Chai-Keong Toh. A review of current routing protocols for ad hoc mobile wireless networks. *IEEE Personal Communications*, 6(2):46–55, April 1999.
- [38] R. Ramanathan and J. Redi. A brief overview of ad hoc networks: challenges and directions. *IEEE Communications Magazine*, 40(5):20–22, May 2002.
- [39] Dictionary.com. [http:// dictionary.reference.com/](http://dictionary.reference.com/).
- [40] Cambridge advanced learner’s dictionary. [http:// dictionary.cambridge.org/](http://dictionary.cambridge.org/), 2004.
- [41] Andrew S. Tanenbaum. *Computer Networks*. Prentice Hall, 4th edition, August 2002.
- [42] Andy Oram. *Peer-To-Peer: Harnessing the Power of Disruptive Technologies*. O’Reilly, first edition, March 2001. ISBN:0-596-00110-X.
- [43] Rüdiger Schollmeier. A definition of peer-to-peer networking for the classification of peer-to-peer architectures and applications. In *IEEE First International Conference on Peer-to-Peer Computing (P2P’01)*, pages 101–102, 2001.
- [44] Hari Balakrishnan, M. Frans Kaashoek, David Karger, Robert Morris, and Ion Stoica. Looking up data in P2P systems. *Communication of the ACM*, 46(2):43–48, 2003.
- [45] Qin Lv, Pei Cao, Edith Cohen, Kai Li, and Scott Shenker. Search and Replication in Unstructured Peer-to-Peer Networks. In *Proceedings of the 16th international conference on Supercomputing*, pages 84–95, New York, 2002.
- [46] X. Li and J. Wu. *Handbook on Theoretical and Algorithmic Aspects of Sensor, Ad Hoc Wireless, and Peer-to-Peer Networks*, chapter Searching Techniques in Peer-to-Peer networks. CRC Press, 2005. To appear.
- [47] Kevin Fall and Kannan Varadhan. *Network Simulator Notes and Documentation*. The VINT Project, 2001.
- [48] The cmu monarch project.the cmu monarch projects wireless and mobility extension to ns, September 2004. Work in Progress.
- [49] G. Gaertner and V. Cahill. Understanding link quality in 802.11 mobile ad hoc networks. *IEEE Internet Computing*, 8(1):55–60, 2004.

- [50] Juan-Carlos Cano and Pietro Manzoni. A performance comparison of energy consumption for mobile ad hoc network routing protocols. In *8th International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems (MASCOTS'00)*, pages 57–64, San Francisco, CA, August 29–September 1 2000. IEEE Computer Society.
- [51] Douglas S. J. De Couto, Daniel Aguayo, John Bicket, and Robert Morris. A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing. In *Proceedings of the 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM'03)*, pages 134–146, San Diego, CA, USA, 2003. ACM Press.
- [52] Ian F. Akyildiz, W. Su, Yogesh Sankarasubramaniam, and Erdal Cayirci. Wireless sensor networks: a survey. *Computer Networks*, 38(4):393–422, December 2002.
- [53] Scott Shenker, Sylvia Ratnasamy, Brad Karp, Ramesh Govindan, and Deborah Estrin. Data-centric storage in sensornets. *SIGMOBILE Mobile Computing and Communication Review*, 33(1):137–142, 2003.