

REDES MÓVEIS SEM FIO AD HOC

Nelson Soares de Rezende

Universidade Federal do Rio de Janeiro
Núcleo de Computação Eletrônica

Pós-graduação *Lato Sensu* em Gerência de
Redes de Computadores e Tecnologia Internet

Prof^ª Luci Pirmez
D.Sc., COPPE/UFRJ, Brasil

Rio de Janeiro

Setembro de 2004

REDES MÓVEIS SEM FIO AD HOC

NELSON SOARES DE REZENDE

Monografia apresentada para obtenção do título de Especialista em Gerência de Redes de Computadores no Curso de Pós-Graduação *Lato Sensu* em Gerência de Redes de Computadores e Tecnologia Internet do Núcleo de Computação Eletrônica da Universidade Federal do Rio de Janeiro – NCE/UFRJ.

Aprovada por:

Prof^ª Luci Pirmez - Orientadora
D.Sc., COPPE/UFRJ, Brasil

Rio de Janeiro

2004

FICHA CATALOGRÁFICA

Rezende, N. S.

Redes Móveis Sem Fio Ad Hoc/ Nelson Soares de Rezende. Rio de Janeiro: UFRJ/NCE, 2004.

xvi, 87 p. 29,7 cm, il.

Monografia (*Lato Sensu*) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, NCE, 2004

1. Redes Ad Hoc 2. Protocolos de roteamento

I. Título II. Monografia (Pós-graduação UFRJ/NCE)

HOMENAGEM ESPECIAL

À minha querida mãe, Djenane, que nos deixou há três anos, depois de um tempo de muito sofrimento e dor, tentando vencer uma enfermidade injusta com muita fibra e coragem. Às vezes, é tão grande o sofrimento de uma pessoa que alcança a todos que lhe são próximos. Ficou-me uma saudade infinita e lembranças eternas!

Dedico este trabalho a ela, que me deixou ricas heranças de Fé, amor, dedicação, carinho, amizade, força e inúmeros exemplos de vida.

Ao meu querido pai Haroldo, por quem
tenho muita admiração e amor,
À minha esposa Sônia, cúmplice em todos os nossos sonhos de amor,
Aos meus irmãos Galeno, Pedro e Eliane, cunhados e sobrinhos,
Aos meus queridos filhos Adriane, Cássia, Raquel e Pedro Henrique,
Ao meu enteado Cristiano que é, para mim, o quinto filho,
E aos meus netos Matheus, Laíza e Nicolás, que me provam
que sempre pode existir um novo começo.

AGRADECIMENTOS

Ao prof. Moacyr de Azevedo, em especial, pela amizade, paciência e dedicação que nos proporcionou durante todo o curso. Quantos calendários!

À prof^a Luci Pirmez pela grande ajuda, paciência, incentivo e orientação indispensáveis. À Flávia e aos demais alunos, orientandos de mestrado e doutorado da prof^a Luci, com quem tive a oportunidade de um breve convívio no ano passado.

A todos os colegas e amigos que tive a oportunidade de conhecer durante o curso (e guardar), em especial ao Alberto Perez, Ana Lúcia, Carlos Eduardo, Cássio, Elenice, Mário, Michele, Rodrigo Moraes.

À secretária Andréa, nossa sempre competente advogada, e à colega Cláudia, nossa memória auxiliar ao longo de todo o curso.

Aos professores do curso que, além da óbvia competência, mostraram qualidades adicionais: Paulo Aguiar, pela experiência e disponibilidade extra-classe; Fábio, pela descontração e bom humor; Peixoto, pela simbiose com os roteadores da Cisco; Carlos, pela segurança; César, *the Flash*; Guedes, pela criatividade; Flávia, pela simpatia; Márcia, pela boa vontade com a turma; e Paula, pelo jeito Cirillo de ser: muita competência e interesse.

Ao IBGE por ter me proporcionado a oportunidade de fazer este curso, em especial ao Diretor de Informática do IBGE, Luiz Fernando Pinto Mariano.

À Ieda Siqueira e Maria Christina, duas grandes amigas do IBGE.

Ao prof. José Antônio Moreira Xexéo, coordenador do curso de Ciência da Computação do Centro Universitário Bennett, pelo apoio.

RESUMO

REZENDE, Nelson Soares de. **Redes Móveis Sem Fio Ad Hoc**. Orientadora: Luci Pirmez. Rio de Janeiro: UFRJ/NCE, 2004. Monografia (Especialização em Gerência de Redes).

Uma **Rede Móvel Sem Fio Ad hoc** é formada por um conjunto de nós móveis, capazes de se comunicar com seus vizinhos por *difusão* (*broadcast*) ou conexões ponto-a-ponto (*point-to-point*), sem necessidade de qualquer infra-estrutura fixa de suporte. O desenvolvimento de protocolos de roteamento para esse tipo de rede apresenta várias particularidades a serem consideradas: a existência de topologia dinâmica, a largura de banda limitada de seus enlaces e a necessidade de conservação de energia.

As redes móveis *ad hoc* podem ser utilizadas em aplicações industriais e comerciais, envolvendo troca de dados móveis de forma cooperativa. Quando combinada adequadamente com a entrega de informação baseada em satélite, a tecnologia de redes móveis *ad hoc* pode prover um método extremamente flexível e eficiente para o estabelecimento de comunicações em operações de incêndio, salvamento e resgate ou em outros cenários que requeiram o estabelecimento imediato de comunicação com redes dinâmicas de sobrevivência.

Dezenas de protocolos têm sido discutidos em centenas de artigos técnicos, sendo que alguns já foram padronizados pelo grupo de trabalho MANET (*Mobile Ad hoc NETWORK*), do IETF: AODV, OLSR, TBRPF e DSR (*Draft*). O crescente interesse das universidades e centros de pesquisa e o volume de publicação hoje disponível mostra a importância deste tema.

Em termos da estratégia de roteamento utilizada, esses protocolos têm sido classificados em pró-ativos, reativos, hierárquicos e apoiados por localização (GPS). Esta monografia discute os principais protocolos de cada classe, analisa as inovações introduzidas por cada um deles e apresenta uma tabela Sumário dos Protocolos de Roteamento para Redes *Ad hoc*.

ABSTRACT

REZENDE, Nelson Soares de. **Redes Móveis Sem Fio *Ad Hoc***. Orientadora: Luci Pirmez. Rio de Janeiro: UFRJ/NCE, 2004. Monografia (Especialização em Gerência de Redes).

A Wireless Mobile Ad hoc Network is formed by a set of mobile nodes, capable of communicating with their neighbors by broadcast or point-to-point connections, without the need of any fixed supporting infrastructure. The development of routing protocols for this type of network presents several characteristics that have to be taken into account: the existence of a dynamic topology, the limited bandwidth of its links and the need for energy conservation.

The mobile *ad hoc* networks can be used in industrial and business applications, involving the interchange of mobile data in a cooperative way. When adequately combined with satellite-based information delivery, the technology of mobile *ad hoc* networks may provide an extremely flexible and efficient method for the establishment of communications in fire control, saving and rescuing operations, or other scenario that demands the immediate communication with dynamic networks of survival.

Dozens of different protocols have been discussed in hundreds of technical papers; some of them have been standardized by the working group MANET (Mobile Ad hoc NETWORK), of the IETF: AODV, OLSR, TBRPF e DSR (*Draft*). The increasing interest of universities and research centers and the quantity of published materials available today show the relevance of this subject.

In terms of the routing strategy used, these protocols had been classified in pro-actives, re-actives, hierarchical and location assisted. This paper discusses the main protocols of each class, analyses the innovations introduced by each of them and presents a summary table of routing protocols for *ad hoc* networks.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACK	Confirmação de recebimento (<i>Acknowledgement</i>).
AMPS	Sistema Avançado de Telefonia Móvel, inventado em 1982 por <i>Bell Labs</i> (<i>Advanced Mobile Phone System</i>).
AP	Ponto de Acesso (<i>Access Point</i>).
ARQ	Repetição automática de requisição (<i>Automatic Repeat reQuest</i>).
ATM	Modo de transferência assíncrona (<i>Asynchronous Transfer Mode</i>).
BACKOFF	Algoritmo de recuo binário exponencial, utilizado pelo protocolo CSMA/CA nas situações em que há probabilidade de ocorrência de colisão nas redes IEEE 802.11 [Tanenbaum, 2003, p.285-288 (<i>Backoff Exponencial Binary</i>)].
BRAN	Redes de acesso por rádio de banda-larga (<i>Broadband Radio Access Networks</i>).
CAC	Controle de acesso a canal (<i>Channel Access Control</i>).
CC	Contenção controlada (<i>Controlled Contention</i>).
CCA	Verificação de canal livre (<i>Clear Channel Assessment</i>).
CCI	Intervalo de contenção controlada (<i>Controlled Contention Interval</i>).
CDMA	Acesso Múltiplo por Divisão de Código (<i>Code Division Multiple Access</i>).
CFP	Período livre de contenção (<i>Contention Free Period</i>).
CGSR	<i>Clusterhead-Gateway Switch Routing</i> .
CSMA/CA	Múltiplo acesso com percepção de portadora e abstenção de colisão (<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i>).
CSMA/CD	Múltiplo acesso com percepção de portadora e detecção de colisão (<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection</i>).
CTS	Autorização para transmitir enviada pelo receptor (<i>Clear To Send</i>).
CW	Janela de contenção utilizada no processo de <i>Backoff</i> (<i>Contention Window</i>).
D-AMPS	Segunda geração dos Sistemas AMPS, totalmente digital (<i>Digital Advanced Mobile Phone System</i>).
DCF	Função de coordenação distribuída (<i>Distributed Coordination Function</i>)
DIFS	Espaço entre quadros da função de coordenação distribuída (<i>Distributed Coordination Function Inter Frame Space</i>).
DLC	Controle de enlace de dados (<i>Data Link Control</i>).
DREAM	<i>Distance Routing Effect Algorithm for Mobility</i> .
DSR	<i>Dynamic Source Routing</i> .
DSSS	Espalhamento do espectro por seqüência direta (<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i>).
DV	<i>Distance Vector</i> .
EC	Controle de erro (<i>Error Control</i>).
EDGE	Taxas de Dados Aperfeiçoadas para Evolução do GSM (<i>Enhanced Data rates for GSM Evolution</i>).
EIFS	Espaço entre quadros estendido (<i>Extended Inter Frame Space</i>).
ETSI	Instituto de Padronização de Telecomunicações Européia (<i>European Telecommunications Standards Institute</i>).
FCC	Comissão de Comunicação Federal Americana (<i>Federal Communication Comission</i>).
FCS	Seqüência de Verificação de quadro (<i>Frame Check Sequence</i>).

FEC	Correção de erro no destino (<i>Forward Error Correction</i>).
FSLs	<i>Fuzzy Sighted Link State</i> .
FSR	<i>Fisheye State Routing</i> .
GeoCast	<i>Geographic-based Broadcasting</i> .
GPS	<i>Global Positioning System</i> .
GPRS	Serviço Geral de Rádio de Pacotes (<i>General Packet Radio Service</i>), que é uma rede de pacotes que se sobrepõe ao D-AMPS e GSM..
GPSR	<i>Greedy Perimeter Stateless Routing</i>
GSM	Sistema Global para Comunicação Móvel (<i>Global System for Mobile Communications</i>).
HCF	Função de coordenação híbrida (<i>Hybrid Coordination Function</i>)
HEC	Verificação de erro de cabeçalho (<i>Header Error Check</i>)
HID	Identificação hierárquica, associada a algoritmos de roteamento do tipo hierárquico (<i>Hierarchical ID</i>)
HSLs	Protocolo de roteamento MANET: <i>Hazy Sighted Link State</i>
HSR	Protocolo de roteamento MANET: <i>Hierarchical State Routing</i>
ID	Identificação (<i>IDentification</i>)
IDEA	Algoritmo padrão para criptografia de dados (<i>International Data Encryption Algorithm</i>)
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IETF	<i>Internet Engineering Task Force</i>
IFS	Espaço entre quadros (<i>Inter Frame Space</i>)
IP	Protocolo Internet (<i>Internet Protocol</i>). Se refere também ao tipo de endereçamento de máquinas conectadas à Internet
IPv4	Protocolo Internet versão 4 (<i>Internet Protocol version 4</i>)
IPv6	Protocolo Internet versão 6 (<i>Internet Protocol version 6</i>)
ISM	Faixa de frequências livre de regulamentação utilizada para redes sem fio (<i>Industrial, Scientific, and Medical</i>)
IWEP	Protocolo de segurança (criptografia) WEP aperfeiçoado, utilizado para redes sem fio (<i>Improved Wireless Equivalent Privacy</i>)
L2CAP	Protocolo de adaptação e controle de enlace lógico (<i>Logical Link Control and Adaptation Protocol</i>)
LANMAR	Protocolo de roteamento MANET: <i>Landmark Ad hoc Routing</i>
LAR	Protocolo de roteamento MANET: <i>Location-Aided Routing</i>
LS	Estado de Enlace (<i>Link State</i>)
LSU	Atualização de Estado de Enlace (<i>Link State Update</i>)
LSI	Informação de Estado de enlace (<i>Link State Information</i>)
LT	Tabela de Localização (<i>Location Table</i>)
MAC	<i>Subcamada de Controle de Acesso ao Meio (Media Access Control)</i>
MACA	<i>Multiple Access with Collision Avoidance</i>
MACAW	<i>Multiple Access Protocol for Wireless LAN</i>
MANET	Rede móvel <i>ad hoc</i> (<i>Mobile Ad hoc NETwork</i>)
MIB	Base de informações de gerenciamento utilizadas através do protocolo SNMP (<i>Management Information Base</i>)
MPDU	Unidade de dados do protocolo MAC (<i>MAC Protocol Data Unit</i>)
MSDU	Unidade de serviço do protocolo MAC (<i>MAC Service Data Unit</i>)
MPR	Retransmissão MultiPonto (<i>MultiPoint Relay</i>)
OADV	Protocolo de roteamento MANET: (<i>On-demand Ad hoc Distance Vector</i>)

OFDM	Multiplexação por divisão de frequências ortogonal, utilizado nas redes IEEE 802.11a/g (<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>)
OSI	Interconexão de Sistemas Abertos (<i>Open Systems Interconnection</i>)
PC	Computador pessoal (<i>Personal Computer</i>)
PCF	Função de coordenação pontual ou centralizada, utilizada em redes sem fio para aplicações que exigem tempo de retardo limitado (<i>Point Coordination Function</i>)
PCI	Interface para conexão de placas de expansão em PCs (<i>Peripheral Component Interconnect</i>)
PCS	Serviços de Comunicações Pessoais (<i>Personal Communications Services</i>).
PDA	Assistente Digital Pessoal, i. e., computadores de mão (<i>Personal Digital Assistant</i>)
PDU	Unidade de dados de protocolo (<i>Protocol Data Unit</i>)
PIFS	Espaço entre quadros de PCF (<i>PCF Inter Frame Space</i>)
QoS	Qualidade de Serviço (<i>Quality of Service</i>)
RF	Radio frequência (<i>Radio Frequency</i>)
RFID	IDentificação de Radio frequência (<i>Radio Frequency IDentification</i>)
RLC	Controle de enlace de radio (<i>Radio Link Control</i>)
RR	Requisição de reserve (<i>Reservation Request</i>)
RSVP	Protocolo de reserve de recursos (<i>Resource Reservation Protocol</i>)
RTTP	Protocolo de transporte de tempo real (<i>Real Time Transport Protocol</i>)
RTS	Requisição para transmissão (<i>Request To Send</i>)
SAP	Ponto de Acesso de Serviço (<i>Service Access Point</i>)
SIFS	Espaço curto entre quadros (<i>Short Inter Frame Space</i>)
TBRPF	Protocolo de roteamento MANTE: (<i>Topology Broadcast Based on Reverse Path Forwarding</i>)
TCP	Protocolo de transporte confiável da arquitetura TCP/IP (<i>Transport Control Protocol</i>)
TDMA	Acesso múltiplo por divisão do tempo (<i>Time Division Multiple Access</i>)
ToS	Tipo de serviço (<i>Type of Service</i>)
UDP	Protocolo de transporte não confiável da arquitetura TCP/IP (<i>User Datagram Protocol</i>)
UI	Interface de usuário (<i>User Interface</i>)
U-NII	Faixa de frequências não licenciada para infra-estrutura de informações. Utilizada no padrão IEEE 802.11a. (<i>Unlicensed National Information Infrastructure</i>)
UMTS	Sistema Universal de Telecomunicações Móveis, O mesmo que W-CDMA. Foi adotado pela União Européia, com o nome de UMTS (<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>).
VLAN	Rede local virtual (<i>Virtual Local Area Network</i>)
W-CDMA	CDMA de banda larga, proposto pela Ericsson (<i>Wideband CDMA</i>).
WDMA	Acesso Múltiplo por Divisão do Comprimento de Onda (<i>Wavelength Division Multiple Access</i>).
WEP	Padrão de criptografia utilizada em redes sem fio, padrão IEEE 802.11 (<i>Wired Equivalent Privacy</i>)
Wi-Fi	Sigla pela qual é conhecido o padrão de rede sem fio IEEE 802.11.
WLAN	Rede local sem fio (<i>Wireless Local Area Network</i>)
WMAN	Rede sem fio metropolitana (<i>Wireless Metropolitan Area Network</i>)

WPAN	Rede pessoal sem fio, utilizada para interligar periféricos tipo mouse, teclado, fone de ouvido etc. Refere-se ao padrão IEEE 802.15 e <i>Bluetooth</i> . (<i>Wireless Personal Area Network</i>)
WWAN	Rede de longa distância sem fio (<i>Wireless Wide Área Network</i>)
ZRP	Protocolo de roteamento MANET: (<i>Zone Routing Protocol</i>)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Classificação dos protocolos de roteamento de redes sem fio <i>ad hoc</i>	16
Figura 2: DSDV – Atualização da tabela de rotas do nó <u>a</u> , com a queda do enlace a-c.....	21
Figura 3: OLSR – Uma ilustração de Retransmissões Multiponto	25
Figura 4: TBRPF – Uma única interface I, do nó i, pode ouvir mais de um feixe de transmissão originada no mesmo nó j.....	27
Figura 5: TBRPF - o nó <u>p</u> é o pai do nó <u>i</u> , no caminho de propagação a partir do nó <u>S</u>	29
Figura 6: AODV – Propagação de RREQ, enviado pelo nó <u>a</u> , para o destino <u>h</u>	31
Figura 7: AODV – Envio de <i>Route Reply</i> à requisição de rota, do nó <u>h</u> para o nó <u>a</u>	32
Figura 8: DSR – Exemplo de propagação de pacotes de controle RREQ.....	35
Figura 9: DSR – Exemplo de propagação de pacotes de controle RREP	35
Figura 10: Roteamento LS por demanda cada nó divulga apenas os enlaces necessários	36
Figura 11: Caminho de i p/ j através de k . k é um vizinho imediato de i , no caminho p/ j	37
Figura 12: OLIVE – Topologia Parcial determinada pelo nó <u>i</u>	37
Figura 13: OLIVE – Grafos de origem dos nós <u>a</u> , <u>b</u> e <u>c</u> , vizinhos do nó <u>i</u> , e árvore de origem final.....	38
Figura 14: Exemplo de inundação eficiente com o uso de <i>agrupamentos de nós</i>	40
Figura 15: LANMAR - Roteamento hierárquico	41
Figura 16: LAR – Propagação apenas para os nós dentro da Zona de Requisição	44
Figura 17: LAR – Cada nó recalcula sua distância até o destino p/decidir se propaga o RREQ ou não.	45
Figura 18: CHAMP – Se o enlace (6,j) cair, esta informação é passada aos demais nós da rede através de mensagens RERR. O nó i (antecessor de 6) pode conhecer uma rota alternativa para o nó j	50

SUMÁRIO

RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	ix
LISTA DE FIGURAS	xiii
SUMÁRIO	xiv
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos	3
1.3 Metodologia de Desenvolvimento	3
1.4 Etapas do Projeto	4
1.5 Organização da Monografia	4
2 REDES MÓVEIS SEM FIO AD HOC	5
2.1 Introdução	5
2.2 Características Básicas das Redes Móveis Ad hoc	6
2.3 Aplicações	8
2.4 Roteamento em Redes Ad hoc	9
2.4.1 Análise de Desempenho de Protocolos de Roteamento	11
2.4.2 Métodos de Análise de Protocolos de Roteamento	14
2.5 Tipos de Esquemas de Roteamento	16
3 ROTEAMENTO EM REDES MÓVEIS AD HOC	19
3.1 Introdução	19
3.2 Protocolos de Roteamento Pró-ativos	20
3.2.1 Protocolo Wireless Routing Protocol (WRP)	21
3.2.1.1 Descrição	21
3.2.1.2 Análise do Protocolo	22
3.2.2 Protocolo Fisheye (FSR)	22
3.2.2.1 Descrição	23
3.2.2.2 Análise do Protocolo	23
3.2.2.3 Variante do Protocolo FSR	24

3.2.3	Protocolo Optimized Link State Routing (OLSR)	24
3.2.3.1	Descrição	24
3.2.3.2	Análise do Protocolo	26
3.2.4	Protocolo Topology Broadcast Base with Reverse Path Forwarding (TBRPF)	26
3.2.4.1	Descrição	26
3.2.4.2	Análise do Protocolo	29
3.3	Protocolos de Roteamento Reativos	29
3.3.1	Protocolo Ad hoc On-demand Distance Vector routing (AODV)	29
3.3.1.1	Descrição	30
3.3.1.2	Processamento do RREQ nos Nós Intermediários	31
3.3.1.3	Processamento do RREP nos Nós Intermediários	32
3.3.1.4	Manutenção de Rotas	32
3.3.1.5	Análise do Protocolo	33
3.3.2	Protocolo Dynamic Source Routing (DSR)	33
3.3.2.1	Descrição	33
3.3.2.2	Descoberta de Rotas	34
3.3.2.3	Manutenção de Rotas	35
3.3.2.4	Análise do Protocolo	35
3.3.3	Protocolo On-Demand Link Vector (OLIVE)	36
3.3.3.1	Descrição	36
3.3.3.2	Detalhes do Algoritmo OLIVE	36
3.3.3.3	Análise do Protocolo	38
3.4	Protocolos de Roteamento Hierárquico	39
3.4.1	Abordagem para construção dos Agrupamentos	40
3.4.2	Protocolo Landmark Ad hoc Routing (LANMAR)	41
3.4.2.1	Descrição	41
3.4.2.2	Análise do Protocolo	42
3.4.3	Protocolo Zone Routing Protocol (ZRP)	42
3.4.3.1	Descrição	42
3.4.3.2	Análise do Protocolo	43
3.5	Protocolos de Roteamento com Localização Geográfica	43
3.5.1	Protocolo Location-Aided Routing (LAR)	44
3.5.1.1	Descrição	44
3.5.1.2	Análise do Protocolo	45
3.5.2	Protocolo Distance Routing Effect Algorithm for Mobility (DREAM)	46
3.5.2.1	Descrição	46
3.5.2.2	Processo de Transmissão de Dados pelo Nó de Origem	46

3.5.2.3	Processo de Retransmissão de Dados pelo Nó Vizinho	47
3.5.2.4	Procedimento de Recepção de Dados pelo Nó de Destino	47
3.5.2.5	Análise do Protocolo	47
3.5.3	Protocolo Caching And MultiPath (CHAMP)	48
3.5.3.1	Introdução	48
3.5.3.2	Objetivos do protocolo CHAMP	50
3.5.3.3	Estratégia de Otimização de Tráfego	51
3.5.3.4	Estrutura de Dados Utilizada pelo Protocolo CHAMP	51
3.5.3.5	Descrição do Protocolo	52
3.5.3.6	Análise do Protocolo	53
4	CONCLUSÕES	55
4.1	Introdução	55
4.2	Análise dos Protocolos de Roteamento	56
4.3	Sumário dos Protocolos	63
5.	REFERÊNCIAS	65

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

Uma rede móvel sem fio é qualquer tipo de rede¹ cujos nós tem algum nível de mobilidade, podendo existir, entretanto, alguns nós fixos, sem mobilidade. Uma das formas de classificação desse tipo de rede é quanto às características de mobilidade de seus nós. Normalmente quando alguns dos nós são fixos, estes, de alguma forma, implementam uma infra-estrutura básica que é responsável pela operacionalização da rede. Por outro lado, quando **todos** os nós da rede são móveis, a rede prescinde de infra-estrutura fixa pré-existente e seus nós se comunicam diretamente entre si, conforme seu interesse. Estas últimas são denominadas *Redes Móveis Ad hoc*. Segundo Obradovic [2002], “Redes móveis *ad hoc* consistem de um número de nós móveis capazes de se comunicar com seus vizinhos por *difusão* (*broadcast*) ou conexões ponto-a-ponto (*point-to-point*)”. A tecnologia de redes móveis sem fio *ad hoc*, apresenta várias particularidades que devem ser consideradas no desenvolvimento de seus protocolos de roteamento, que são: a existência de topologia dinâmica, a largura de banda limitada de seus enlaces e a necessidade de conservação de energia.

O funcionamento correto dos protocolos de roteamento e sua eficiência² e desempenho³ na descoberta e manutenção de rotas e no encaminhamento de pacotes é de extrema e fundamental importância para viabilizar a utilização de soluções baseadas nesse tipo de rede para aplicações robustas e/ou críticas.

O uso de enlaces⁴ **de capacidades baixas ou moderadas** (comuns nesse tipo de rede)

¹ que, em geral, utiliza rádio frequência ou infravermelho para a comunicação entre seus nós.

² Eficiência é a capacidade de determinar o caminho para o nó de destino e de lhe entregar os pacotes de dados. Pode ser calculada pela fórmula: <nº de pacotes entregues> / <nº de pacotes enviados>

³ taxa média de entrega de pacotes por unidade de tempo.

⁴ O termo “enlace”, aqui empregado, se refere ao mecanismo de rádio frequência usado na comunicação entre dois nós e que pode ser permanente ou temporário, dependendo da mobilidade e alcance desses nós.

não permite o desperdício dos recursos de comunicação em decorrência de erros ou ineficiências dos protocolos de roteamento. Em razão disso, muito se tem pesquisado e escrito a respeito das redes móveis *ad hoc*, conhecidas como tecnologia MANET (*Mobile Ad hoc NETWORKING*), e essas pesquisas e publicações técnicas⁵ têm abordado o assunto segundo um dos três enfoques seguintes:

- **Desenvolvimento de novos protocolos de roteamento e/ou aperfeiçoamento de protocolos já conhecidos:** a literatura está repleta de artigos técnicos sobre esse tipo de abordagem [Soumya, 2003];
- **Avaliação de protocolos de roteamento utilizando simulações e testes:** geralmente esse tipo de estudo complementa testes que abordam objetivos específicos como, por exemplo, a comprovação de falhas ou ineficiências de algum protocolo de roteamento; o estudo comparativo do desempenho de protocolos de roteamento com base em cenários⁶ específicos; ou ainda um trabalho acadêmico para o estudo e aprendizado de protocolos [Lee, 2003];
- **Verificação formal de protocolos de roteamento:** devido à complexidade e dinamismo da topologia das redes móveis *ad hoc*, não é possível garantir a correção de um protocolo de roteamento apenas através de testes e simulação, que, normalmente, se baseiam no estabelecimento de um “modelo de diagrama de estados” e não consideram **todas** as situações (estados) possíveis, tratadas pelo protocolo. Essa garantia efetiva só pode ser dada através de métodos formais de verificação, [Obradovic, 2000].

Embora existam, ainda, poucos trabalhos de verificação formal de protocolos, esta técnica já permitiu a identificação de ocorrências de **laço (loop)** para o protocolo de roteamento AODV (*Ad hoc On-Demand Distance Vector*) para redes *ad hoc* [Bhargavan 2000 *apud* Lauschner 2001]. Referido trabalho permitiu a proposição de modificações que, garantidamente, eliminaram estas condições de *laço*.

⁵ [Cordeiro, 2002; Hong, 2002a; Lauschner, 2001; Bhargavan, 2000; Obradovic, 2000; Corson, 1999], entre inúmeros outros.

⁶ É sabido que numa rede móvel *ad hoc* a densidade de nós, a taxa de mobilidade de seus nós e as velocidades e direção de seus deslocamentos tem reflexo direto no desempenho dos protocolos de roteamento.

Em outro trabalho importante [Obradovic, 2002], foi abordada a questão da convergência dos protocolos de roteamento, i. e., do processo de troca de informações entre os nós móveis para estabelecer ou atualizar rotas. Segundo o autor, a propagação de informações em uma rede consome tempo e, conseqüentemente, essa convergência não pode ser instantânea. As informações relevantes são propagadas pelo sistema até que este entre em um estado estável em que, **naquele instante**, as rotas válidas (ou apenas as necessárias⁷, dependendo da abordagem do protocolo) são conhecidas. A proposição do autor foi estudar o que ocorre com este tipo de protocolo antes de ser alcançado o estado estável e se, nesse ínterim, houve a ocorrência de algum tipo de *laço* e por quanto tempo ele permaneceu nesse *laço*.

1.2 Objetivos

O objetivo desta monografia é apresentar um estudo da tecnologia de redes móveis sem fio, mais especificamente das redes móveis sem fio não infra-estruturadas, comumente conhecidas como redes móveis sem fio *ad hoc* e discutir os principais protocolos de roteamento específicos para este tipo de rede, além de propor a criação de uma tabela denominada Sumário dos Protocolos de Roteamento para Redes Ad hoc, em que são sintetizadas as principais características de cada um desses protocolos.

A quantidade de publicações abordando redes móveis sem fio *ad hoc* é muito grande, o que torna o presente trabalho bastante útil para o desenvolvimento de futuras análises de desempenho de algoritmos de roteamento ou de planejamento de solução de rede *ad hoc* para alguma aplicação específica.

1.3 Metodologia de Desenvolvimento

Este trabalho foi iniciado com um amplo levantamento bibliográfico das publicações que abordam a tecnologia de redes móveis sem fio *ad hoc* e foram estudados, em cada publicação, os protocolos discutidos e o tipo de estudo realizado a respeito.

⁷ Ao contrário das redes tradicionais, as redes *ad hoc* permitem o uso de protocolos que guardam rotas apenas para os destinos para os quais existem dados a transmitir: as rotas podem ser descobertas **por demanda** (*On-demand*).

A partir desse levantamento foi estabelecido um processo de classificação que permitisse discutir cada um dos principais protocolos e estabelecer o conjunto de atributos e métricas a serem consideradas na elaboração da síntese contida na tabela de síntese comparativa dos protocolos, já referida.

1.4 Etapas do Projeto

1. Organização do material bibliográfico
2. Classificação do material bibliográfico
3. Seleção dos principais protocolos de roteamento e das métricas para a construção da síntese proposta
4. Estudo detalhado dos protocolos e construção da tabela
5. Redação da Monografia
6. Apresentação da Monografia

1.5 Organização da Monografia

Esta Monografia está organizada da seguinte forma:

O Capítulo 1 aborda a motivação, objetivos e metodologia utilizada no desenvolvimento deste trabalho.

O Capítulo 2 discorre sobre as características básicas de redes móveis *Ad hoc*, suas aplicações e requisitos a serem atendidos por seus protocolos de roteamento. Se detém, ainda, nas questões relativas às metodologias de análise de desempenho desses protocolos e termina com a apresentação dos tipos de esquemas de roteamento, segundo os métodos utilizados para requisição, tratamento e manutenção de rotas e encaminhamento dos pacotes de dados.

O Capítulo 3 está estruturado segundo os tipos de esquema de roteamento descritos no Capítulo 2 e discute os principais protocolos de roteamento, tecendo comentários sobre alguns aspectos mais relevantes da abordagem apresentada em alguns artigos estudados.

Finalmente, o Capítulo 4 conclui o trabalho com a apresentação da tabela Sumário de Protocolos de Roteamento para Redes *Ad hoc*, que procura sintetizar a análise dos protocolos de roteamento segundo o conjunto de métricas estabelecidas, e apresenta as conclusões do estudo.

2 REDES MÓVEIS SEM FIO AD HOC

2.1 Introdução

A tecnologia de redes móveis sem fio não-estruturadas ou *ad hoc*, referidas em inglês como *Mobile Ad hoc NETWORKING* (MANET), foi discutida na RFC2501 [Corson, 1999], que faz considerações sobre avaliação de desempenho dos protocolos de roteamento utilizados neste tipo de rede. Ainda segundo o mesmo autor, essa tecnologia foi uma evolução das **Redes Móveis de Pacotes via Rádio** (*Mobile Packet Radio Networking*) e das **Redes de Malha Móvel** (*Mobile Mesh Networking*).

Esse tipo de rede não possui nenhuma estação fixa, todos os seus nós podem se mover livremente e se conectar dinamicamente de uma maneira arbitrária. A responsabilidade pela organização e controle da rede é distribuída entre todos os seus nós. Segundo [Cordeiro 2002], uma rede móvel *ad hoc* é definida como “um sistema autônomo de equipamentos móveis (também servindo como roteadores) conectados por enlaces sem fio, a união dos quais forma uma rede de comunicação modelada na forma de um grafo arbitrário.” Esses equipamentos móveis, doravante denominados simplesmente **nós**, podem estar localizados em aviões, navios, caminhões, carros, ou mesmo em pessoas ou em dispositivos muito pequenos.

As aplicações mais destacadas na literatura para esse tipo de rede são as da área militar onde, num campo de guerra, por exemplo, os tanques de um batalhão podem querer estabelecer uma comunicação imediata num ambiente hostil e ruidoso, não havendo tempo ou recursos para criar uma infra-estrutura cabeada. Outras possíveis aplicações seriam em missões de resgate decorrentes de desastres naturais; aplicações comerciais e educacionais e redes de sensores.

De acordo com a última definição apresentada, numa rede móvel *ad hoc*, também conhecida como rede **ponto-a-ponto** (*peer-to-peer*), podem existir um ou mais pares de nós que não conseguem se comunicar diretamente, por estarem fora da área de alcance um do outro. Ainda assim, a comunicação entre esses dois nós pode ocorrer mas, neste caso, com a ajuda de **nós intermediários** que se disponham a fazer a retransmissão (*relaying*) das mensagens. De um modo geral, todos os nós dessas redes funcionam como roteadores que descobrem e mantêm rotas para outros nós na rede.

Em outras palavras, para que dois nós específicos possam se interoperar numa rede móvel *ad hoc* podem ser necessários **múltiplos saltos** e esse número de saltos depende da quantidade de nós intermediários utilizados para viabilizar a comunicação entre aqueles dois nós. Esse tipo de rede exige que os pacotes de informação sejam transmitidos na forma **armazena-e-envia** (*store-and-forward*), da origem até um destinatário arbitrário, através dos nós intermediários.

Quando os nós se movem, a mudança resultante na topologia da rede deve ser informada a todos os outros nós, de tal forma que as informações sobre a topologia possam ser atualizadas permanentemente. Estas redes são tolerantes à falha e à retirada de estações (nós) pois sua organização e controle não dependem apenas de **alguns** nós determinados, pois **todos** os seus nós têm a função de fazer roteamento e retransmissão de pacotes. Da mesma forma, novos nós podem ser adicionados, facilmente, a essas redes.

Este conceito contrasta com o das redes de celulares, que utilizam o modelo de rede de salto simples (*single hop*), isto é, entre os dispositivos de origem e de destino existe apenas a estação de base, que opera como um ponto de acesso fixo. Nessas redes, a comunicação entre dois nós móveis depende completamente do *backbone* cabeado e das estações de base fixas. Em uma rede móvel sem fio *ad hoc*, por outro lado, não existe nenhuma infra-estrutura e a topologia da rede pode mudar dinamicamente, de uma forma não previsível, já que os nós podem se mover livremente.

2.2 Características Básicas das Redes Móveis Ad hoc

Como foi visto, a topologia de uma rede móvel sem fio *ad hoc* pode variar em função da movimentação de seus nós e de ajustes em seus parâmetros de transmissão e recepção, o que pode alterar suas áreas de alcance ou cobertura. Em um dado momento, a existência ou não de conectividade sem fio entre um dado conjunto de nós depende:

- de suas posições,
- dos padrões de cobertura de seus transmissores e receptores,
- dos seus níveis de potência de transmissão e de recepção, e
- dos níveis de interferência entre os canais de comunicação utilizados.

Essa plataforma móvel pode operar de forma isolada ou ter portas (*gateways*) para uma rede fixa. Neste último caso, tem-se, tipicamente, uma rede *stub* conectando a rede sem fio a uma interrede fixa. Redes *stub* carregam tráfego originado ou destinado aos nós internos, mas não permitem que tráfego exógeno (originado e destinado a redes externas) passe através delas.

Nós de redes móveis *ad hoc* são equipados com transmissores e receptores sem fio, usando antenas que podem ser:

- omnidirecionais – transmissão por rádio-difusão (*broadcast*);
- altamente direcionais – transmissão ponto-a-ponto, ou
- guiadas.

As redes móveis sem fio possuem as seguintes características principais [Corson, *op. cit.*]:

- a) **Topologias dinâmicas:** os nós são livres para se mover arbitrariamente; assim, a topologia da rede, que é tipicamente de múltiplos saltos, pode mudar rapidamente em momentos imprevisíveis e de forma aleatória, e pode ser constituída de conexões bidirecionais e/ou unidirecionais e são, geralmente, estabelecidas por enlaces (*links*) sem fio de largura de banda limitada, que utilizam esquemas de propagação de sinal específicos.
- b) **Enlaces com capacidade variável e largura de banda limitada:** enlaces sem fio continuam tendo capacidade significativamente menor que enlaces com fio. Além disso, o *throughput* obtido – considerando-se os efeitos de múltiplos acessos, desvanecimento (*fading*), ruído, e condições de interferência etc. – é, geralmente, muito menor que a taxa de transmissão máxima de rádio. A ocorrência de **congestionamentos** é a situação normal de operação desse tipo de rede e não a exceção, em consequência dos enlaces terem capacidades relativamente baixas ou moderadas.
- c) **Operação de conservação de energia:** Alguns ou todos os nós de uma rede móvel *ad hoc* podem depender de baterias ou de outros meios exauríveis como forma de energia. Neste cenário, o critério de otimização de projeto de sistema mais importante pode ser a questão da conservação de energia.

- d) **Segurança física limitada:** Redes móveis sem fio são, geralmente, mais propensas a sofrer ameaças à segurança física do que as redes cabeadas, já que apresentam maior probabilidade de sofrerem ataques de escuta (*eavesdropping* ou *sniffing*), de logro (*spoofing*) e de negação de serviço (*denial-of-service*). Técnicas de segurança de enlaces são, frequentemente, aplicadas dentro de redes sem fio para reduzir ameaças à segurança. Uma vantagem do controle de rede de natureza descentralizado das redes móveis *ad hoc* é que oferecem redundância adicional (maior robustez) contra pontos de falha simples, comuns nas abordagens centralizadas.

2.3 Aplicações

A RFC 2501 [Corson, *op. cit.*] coloca a questão de que há demandas crescentes para a tecnologia de redes *ad hoc* dinâmicas e a ênfase atual na utilização de IP móvel, deverá, gradualmente, ampliar-se e requerer tecnologia móvel altamente adaptativa para, efetivamente, gerenciar grupos de redes *ad hoc* de múltiplos saltos que possam operar de forma autônoma e, muito provavelmente, estar conectada à Internet fixa em algum ponto.

Alguns estudos [Hong, 2002b e 2002d; Xu, 2002c; Bao, 2002e] sobre este tipo de rede sugerem que os nós da rede sejam organizados em grupos, de tal forma que a troca de informações só ocorra entre os nós de um mesmo grupo.

Este é o caso, por exemplo, de aplicações da área de vendas numa concessionária de automóveis, cujos vendedores podem se deslocar pelo pátio da empresa com dispositivos móveis e recuperar informações sobre determinados veículos à venda, enquanto outras áreas da empresa, como a recepção e a oficina, trocam informações entre si e fazem uso de aplicações diferentes.

Outros tipos de aplicações de redes móveis *ad hoc* incluem aplicações industriais e comerciais, envolvendo troca de dados móveis de forma cooperativa. Além disso, redes móveis baseadas em malhas podem ser utilizadas como alternativas, ou como soluções robustas e baratas, para o uso de infra-estruturas de redes móveis baseadas em células.

Quando combinada adequadamente com a entrega de informação baseada em satélite, a tecnologia de redes móveis *ad hoc* pode prover um método extremamente flexível para o estabelecimento de comunicações para operações de incêndio, salvamento e resgate ou outros cenários que requeiram o estabelecimento ágil e imediato de comunicação com redes

dinâmicas de sobrevivência. Com os recentes avanços no desempenho das tecnologias dos computadores e das redes sem fio, é esperado o desenvolvimento de novas aplicações para computação móvel sem fio avançada e, conseqüentemente, o crescimento na utilização deste tipo de rede.

2.4 Roteamento em Redes *Ad hoc*

Normalmente, as aplicações de redes móveis *ad hoc* utilizam o conjunto de protocolos TCP/IP. O foco do desenvolvimento que se têm feito com respeito a este tipo de rede é no sentido de viabilizar o suporte a operações robustas e eficientes, incorporando funcionalidades de roteamento nos próprios nós móveis. Isto apresenta, ainda, grandes desafios para a comunicação sem fio, tendo em vista as questões relacionadas ao consumo de energia e à confiabilidade dos enlaces.

Dentro da comunidade Internet, o suporte a roteamento para equipamentos móveis (nós) tem sido referido como **tecnologia de “IP móvel”** [Corson *op. Cit.*], e se propõe a suportar nós nômades ou “viajantes” (“*roaming*”) em situações em que estes podem estar conectados à Internet de várias formas, utilizando recursos distintos do *espaço de endereços de domínio fixo* que conhecemos. Um nó móvel pode estar física e diretamente conectado a uma sub-rede externa de alguma rede fixa, ou estar conectado via uma conexão sem fio, uma linha discada etc. Suportar esta forma de mobilidade requer melhorias no gerenciamento de endereços e na interoperabilidade de protocolos, entre outros aspectos.

A tecnologia de IP Móvel implementa o suporte a **nós viajantes**, da seguinte forma: quando um nó se move para fora de sua rede de origem, tornando-se um *nó viajante* em uma rede externa (*roaming*), ele informa a um nó de sua rede de origem, denominado *agente retransmissor (home agent)*, que os pacotes a ele endereçados devem ser retransmitidos para determinado nó da rede externa, denominado *agente receptor*⁸ (*foreign agent*), naquela rede. Em seguida, ele se registra no *agente receptor* para que todos os pacotes a ele endereçados sejam redirecionados, através do *agente retransmissor* de sua rede de origem, para o *agente receptor* que os entrega ao *nó viajante*. Quando o *nó viajante* retorna à sua rede de origem, ele informa a ambos os nós (*agentes*) envolvidos no redirecionamento dos pacotes que foi

⁸ Este *nó receptor* é que tem a responsabilidade de “entregar” os pacotes ao *nó visitante*.

restabelecida a configuração original. Observe que nenhum outro nó, de nenhuma rede externa, precisa ser informado da movimentação do *nó viajante*, já que os *agentes retransmissor* e *receptor* garantem a entrega dos pacotes durante todo o processo de visita (*roaming*).

Numa rede sem fio estruturada, os nós mais indicados para as funções de retransmissor e de receptor são os *pontos de acesso* das células de origem e de destino do *nó viajante*, mas não obrigatoriamente, já que quaisquer outros nós podem assumir estas funções. Numa rede móvel *ad hoc*, porém, não existe o conceito de *agente retransmissor*, já que **todos** os nós são móveis e podem se deslocar livremente.

As funções de núcleo de rede, em geral, utilizam os protocolos de roteamento tradicionais já conhecidos, que implementam técnicas de roteamento denominadas vetor de distâncias (*distance-vector* ou *hop-by-hop*) ou estado dos enlaces (*link-state*), utilizados na operação das redes cabeadas [Tanenbaum, 2003, p.379 a 388]. Ao contrário deste tipo de solução, a meta das redes móveis sem fio *ad hoc* é estender o conceito de mobilidade para permitir que domínios móveis sem fio, totalmente autônomos, compostos por um conjunto de nós (que podem ser roteadores e estações combinadas) formem, eles mesmos, uma infra-estrutura de roteamento de rede do tipo *ad hoc*.

O roteamento em redes móveis sem fio *ad hoc* é, intrinsecamente, diferente do roteamento tradicional utilizado em redes infra-estruturadas, pois seus nós possuem grande limitação de recursos, principalmente, com respeito à largura de banda e à autonomia de bateria. Ainda, a população (quantidade de nós) em uma rede móvel sem fio *ad hoc* é, em geral, muito menor que a de redes cabeadas. Desta forma, a questão da escalabilidade dos protocolos de roteamento para redes sem fio de múltiplos saltos pode ser impactada por sobrecargas excessivas de mensagens de roteamento causadas pelo crescimento da população e pela mobilidade da rede. Neste tipo de rede, os protocolos de roteamento dependem de vários fatores específicos, como topologia, método de inicialização da requisição, escolha dos roteadores a serem utilizados (nós intermediários), bem como de características específicas da localização dos nós, o quê pode servir como heurística para a determinação do caminho mais rápido e mais eficiente para o nó de destino.

Como foi visto, o roteamento entre dois nós específicos pode depender dos serviços de encaminhamento de pacotes providos por outros **nós intermediários**, denominados **nós de**

salto (*hop nodes*), responsáveis pelo encaminhamento dos pacotes entre origem e destino. Como os **nós de salto** também podem se mover livremente, o caminho de roteamento considerado ótimo no momento do encaminhamento de um pacote pode conter nós de salto que não farão parte do caminho de roteamento ótimo no momento seguinte. Ainda, num dado instante, pode até nem existir caminhos entre aqueles mesmos dois nós de origem e de destino.

Segundo Obradovic [2000, 2002], são requisitos para os protocolos de roteamento de redes *ad hoc*:

- Ter reação rápida às mudanças de topologia, descobrindo novas rotas no menor tempo possível;
- Manter “boas” rotas, mesmo quando tráfego (*throughput*) for máximo;
- Enviar a quantidade mínima de informações de controle.

Geralmente, há um compromisso entre estes três requisitos que precisa ser considerado pelos protocolos de roteamento das redes *ad hoc* [Lauschner 2001]. Na sessão seguinte são feitas algumas considerações relativas à análise de desempenho de protocolos de roteamento.

2.4.1 Análise de Desempenho de Protocolos de Roteamento

Os principais aspectos a serem considerados nos estudos de redes de comunicação de dados compreendem a **confiabilidade**, **disponibilidade** e **desempenho** da rede. A **confiabilidade** se refere ao estudo de métricas relacionadas a ocorrências de erros de transmissão, de entregas de pacotes fora de ordem, de entregas de pacotes duplicados etc. A determinação da **disponibilidade** efetiva da rede considera o estudo de métricas relativas à capacidade nominal da rede, aos valores do tempo médio entre ocorrências de erros e do tempo médio para recuperação desses erros etc. O **desempenho** da rede é calculado a partir de métricas relacionadas ao número de pacotes transmitidos corretamente por unidade de tempo, ao consumo de recursos da rede para o envio de mensagens de controle (gerência da rede, sincronismo e autenticação entre as estações, determinação e manutenção de rotas), à variabilidade do tempo de resposta etc.

Conhecer as aplicações utilizadas na rede é também fundamental para se determinar o conjunto de métricas a serem consideradas na análise das medidas de desempenho da rede. O

tráfego de voz tem exigências de tempo de resposta e de controle de atrasos que não são importantes para aplicações de transferência de arquivos, por exemplo.

De um modo geral, a análise de protocolos de roteamento de redes móveis sem fio *ad hoc* deve considerar as seguintes classes de propriedades:

- **Propriedades qualitativas** – conjunto de propriedades que contribuem para uma melhor “eficiência” dos processos de determinação e manutenção das rotas utilizadas pelos algoritmos de roteamento;
- **Propriedades quantitativas** – conjunto de propriedades que contribuem para garantir um melhor desempenho da rede na transmissão de dados.

São **propriedades qualitativas**:

- **Operação distribuída**: a responsabilidade pela determinação de rotas deve ser distribuída, pois é impossível utilizar roteamento centralizado em uma rede dinâmica, mesmo em redes pequenas;
- **Inexistência de laços (*loops*)**: ainda que não esteja incorporado no protocolo de roteamento, o campo TTL (*Time To Live*) do datagrama IP pode ser utilizado para evitar que pacotes fiquem circulando pela rede por um período de tempo muito longo, desnecessariamente. Esta propriedade é desejável para garantir um uso eficiente dos recursos e um melhor desempenho geral da rede.
- **Operação baseada em demanda**: O algoritmo de roteamento deve se adaptar ao tráfego sob demanda e fazer uma utilização eficiente da energia e dos recursos de largura de banda da rede. A desvantagem óbvia, neste caso, é o aumento do retardo.
- **Operação pró-ativa**: Em alguns contextos, a latência adicional, decorrente da operação baseada em demanda, pode ser inaceitável e a operação pró-ativa deve ser usada, caso os recursos e a largura de banda o permitam.
- **Segurança**: Embora existam preocupações de segurança dentro das redes estruturadas e dos protocolos de roteamento, na prática, a manutenção da segurança “física” do meio de transmissão é mais difícil e complexa nas redes móveis *ad hoc*.

- **Operação em período de “inatividade” (*sleep*):** Como decorrência da conservação de energia ou de outras necessidades, os nós de uma rede móvel sem fio *ad hoc* podem parar de transmitir e/ou de receber (mesmo o processo de recepção consome energia) por períodos de tempo arbitrários, i. e., os nós podem ficar **inativos**. Um protocolo de roteamento deve ser capaz de acomodar tais períodos de “inatividade” sem introduzir conseqüências adversas. Esta propriedade pode requerer uma interação com os protocolos de camada de Ligação (*Data Link Layer*) do Modelo de Referência ISO/OSI, através do uso de uma interface padronizada.
- **Suporte a enlaces unidirecionais:** Muitos algoritmos assumem, tipicamente, que os enlaces são bidirecionais e são incapazes de operar adequadamente sobre enlaces unidirecionais. No entanto, freqüentemente, podem existir enlaces unidirecionais em redes sem fio. Geralmente, existe um número suficiente de enlaces bidirecionais e, neste caso, a vantagem adicional agregada pelo uso de enlaces unidirecionais é limitada. Podem existir situações, entretanto, em que um par de enlaces unidirecionais (de sentidos opostos) formam o único enlace bidirecional disponível.

São **propriedades quantitativas**:

- **Taxa de transmissão de dados (*throughput*)** – quantidade de pacotes transmitidos por unidade de tempo;
- **Tempo de resposta e atraso fim-a-fim** – tempo entre o início e o fim da transmissão de um pacote;
- **Tempo de aquisição de rota** – tempo para determinação de uma rota para o destino, e que reflete na medida do atraso fim-a-fim;
- Percentagem de entrega de pacotes fora de ordem (*out-of-order*);
- **Eficiência** – medida pela relação entre a capacidade útil máxima da rede e sua capacidade nominal.

É importante observar que, na análise do desempenho de um protocolo, deve ser considerado o “contexto” (topologia) da rede [Freitas, 2001], cujos atributos essenciais incluem:

- **Tamanho da rede:** deve ser medida em termos do número de nós?
- **Conectividade da rede:** deve ser medida em termos do grau médio de um nó, i. e. do número médio de vizinhos de um nó?
- **Taxa de mudança de topologia:** deve ser medida em termos da velocidade em que a topologia da rede varia?
- **Capacidade do enlace:** qual é a velocidade efetiva do enlace, em *bits/s*, descontando-se as perdas devido a acesso múltiplo, codificação, enquadramento etc.?
- **Fração de enlaces unidirecionais:** qual é, efetivamente, o desempenho de um protocolo, considerando-se a existência dos enlaces unidirecionais?
- **Padrões de tráfego:** quão efetivo é um protocolo em se adaptar a padrões de tráfego não uniformes ou a congestionamentos?
- **Mobilidade:** qual é a relevância da correlação topológica temporal e espacial no desempenho de um protocolo de roteamento? Ainda, qual é o modelo apropriado para simular a mobilidade de um nó em uma rede móvel sem fio *ad hoc*?

2.4.2 Métodos de Análise de Protocolos de Roteamento

Desde 1994, vários pesquisadores têm proposto e discutido diferentes métodos para a análise de protocolos de roteamento, conforme citado em [Lauschner, 2001]. As abordagens apresentadas podem ser classificadas nos seguintes tipos:

- a) **análise comparativa de características técnicas dos principais protocolos** – em geral, examina e avalia protocolos de roteamento com base em algum conjunto de parâmetros específicos. Normalmente, esse tipo de análise é feita a partir de um levantamento dos protocolos de roteamento relevantes para referido estudo [Royer, 1999 e Kashyap, 2001];

- b) **análise formal da convergência dos esquemas de atualização de rotas** [Cordeiro, 2002] – em geral, se preocupa com a verificação formal do processo de convergência dos métodos utilizados para a atualização das rotas, e
- c) **técnicas automáticas de comprovação da correção de protocolos** [Bhargavan, 2000; Obradovic, 2000 e 2002] – A metodologia proposta por Bhargavan [2000] e utilizada por Obradovic [2000, 2002] é uma metodologia **formal** (demonstra teoremas matemáticos relativos aos protocolos de roteamento) e **sistemática** (considera todos os possíveis comportamentos do protocolo) e pode ser aplicada quando da concepção de um protocolo e antes de sua implementação e desenvolvimento. Pode ser automatizado parcialmente, através do uso de sistemas verificadores de modelos (SPIN⁹) e de sistemas provadores de teoremas (HOL¹⁰).

É importante observar que o número de proposições de protocolos para redes móveis *ad hoc* é muito grande e cada um deles tem seu cenário ótimo, no qual apresenta um desempenho superior. Esses cenários dependem dos modelos de tráfego, da mobilidade dos nós e do tamanho da rede. Segundo HSIN [2001/2002] “Nenhum protocolo, realmente, supera os outros em todos os cenários”. Outros autores, como Boukerche (2001), apenas comparam o desempenho de diferentes protocolos de roteamento.

Têm sido propostos muitos protocolos de roteamento específicos para redes móveis sem fio *ad hoc* e, no próximo capítulo, serão discutidos os mais importantes e que têm sido abordados com maior ênfase na bibliografia consultada. Alguns desses protocolos têm sido estudados no IETF (*Internet Engineering Task Force*) objetivando sua padronização, sendo que três deles já foram padronizados, conforme discutido no capítulo 4.

⁹ O Sistema HOL, pronuncia-se com em *doll* ou H-O-L, é um ambiente interativo para prova de teoremas em uma lógica de mais alta ordem. Seus recursos mais notáveis se baseia em seu alto grau de programabilidade através da meta-linguagem ML. Veja em <http://www.cl.cam.ac.uk/Research/HVG/HOL/>

¹⁰ SPIN é uma ferramenta de *software* que pode ser usada para a verificação formal de sistemas de *software* distribuídos. Foi desenvolvida pelos Laboratórios Bell dentro do grupo original de Unix do Centro de Pesquisas em Ciência da Computação, iniciado em 1980. Veja em <http://spinroot.com/spin/whatispin.html>.

2.5 Tipos de Esquemas de Roteamento

Inúmeras publicações classificam os esquemas de roteamento de acordo com a estratégia de roteamento implementada, referenciando os **esquemas pró-ativos**, em que todos os nós mantêm as informações completas de roteamento da rede, as quais são atualizadas continuamente; e os **esquemas reativos**, em que os nós mantêm apenas as rotas para os destinos que estiverem ativos.

Uma publicação recente [Hong 2002a] apresenta duas classes adicionais de protocolos de roteamento, denominados **esquemas hierárquicos**, em que são atribuídas funções diferenciadas para os nós da rede; e **esquemas assistidos por localização**, em que todos os nós são equipados com o Sistema de Posicionamento Global (GPS), que permite estabelecer mecanismos para a determinação da localização geográfica dos nós da rede. Esta mesma publicação agrupa os esquemas **pró-ativos** e **reativos** em uma única classe, que denomina de **esquemas flat**. No escopo do presente trabalho estes dois esquemas não estão agrupados, adotando-se a estrutura apresentada na figura 1, que mostra os principais protocolos de roteamento de redes móveis *ad hoc* aqui discutidos.

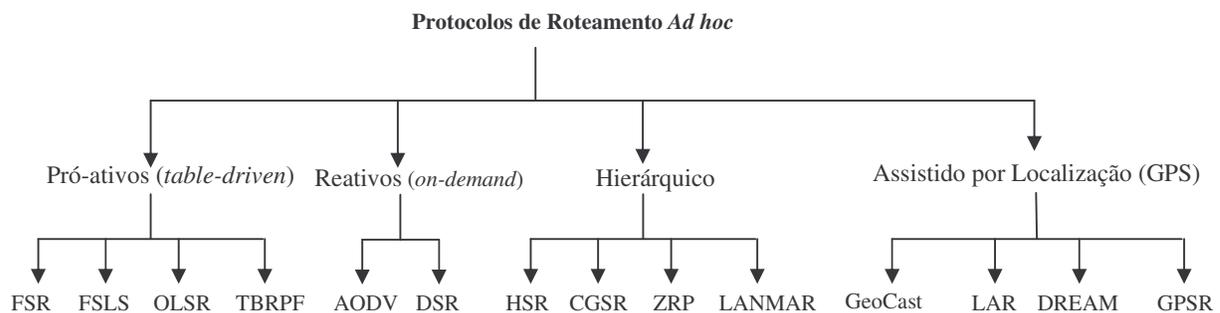


Figura 1: Classificação dos protocolos de roteamento de redes sem fio *ad hoc*

Nos **esquemas pró-ativos**, também referidos como esquemas orientados-por-tabela (*table-driven*), todos os nós mantêm as informações completas de roteamento da rede as quais são atualizadas continuamente. Quando um nó tiver que encaminhar um pacote, a rota necessária já estará disponível, não sendo gerado nenhum atraso na transmissão decorrente do processo de busca de rotas. Para uma topologia muito dinâmica, entretanto, os esquemas pró-ativos consomem uma quantidade significativa de recursos dos enlaces sem fio, que possuem capacidades limitadas, para manter as informações completas de roteamento sempre corretas e atualizadas.

Exemplos de esquemas pró-ativos são os tipos de roteamento baseados em **vetor de distâncias** (*distance vector*) ou em **estado de enlaces** (*link state*), utilizados nas redes cabeadas tradicionais. No caso de **vetor de distâncias** (ou Bellman-Ford distribuído) cada nó **i** obtém, para cada destino **j**, o “custo” de enviar uma mensagem para esse destino através de cada um de seus nós vizinhos (de **i**) e, em seguida, escolhe o caminho de custo mínimo. Esse “custo” é calculado, normalmente, em termos da distância (número de enlaces percorridos) até o nó de destino. No caso de **estado de enlaces** cada nó **i** mantém a informação da topologia da rede e do “custo” associado a cada um dos enlaces, podendo determinar o caminho de custo mínimo para cada destino **j** a partir das informações da topologia da rede.

Nos **esquemas reativos**, também referidos como esquemas baseados-em-demanda (*demand-based*), os nós somente mantêm as rotas para os destinos que estiverem ativos. Uma busca de rota é necessária para todos os novos destinos. Esses esquemas são importantes para o ambiente *ad hoc* porque a potência das baterias é preservada não só quando não for necessário enviar anúncios de rotas, mas também quando não for preciso recebê-los. Quanto menor a circulação de anúncios de rotas, mais tempo terão os nós, que não estiverem executando outras tarefas, para reduzir o consumo de potência, se colocando em modo de “inatividade” ou de “espera”.

Um exemplo de esquema reativo é o **Roteamento de Origem Dinâmico** (*DSR - Dynamic Source Routing*) em que o nó de origem indica, nos cabeçalhos dos pacotes de dados, a seqüência de nós intermediários que estabelecem o caminho de roteamento a ser usado.

Nos **esquemas hierárquicos** são atribuídas, geralmente, regras de roteamento diferenciadas para os nós da rede. O princípio utilizado nesse tipo de protocolo pressupõe a organização dos nós em grupos, de acordo com suas características e demandas, e o estabelecimento de funcionalidades diferenciadas para os nós de dentro e de fora de cada grupo. Desta forma, o tamanho das tabelas de roteamento e, conseqüentemente, o tamanho dos pacotes de atualização de rotas tornam-se menores porque contêm informações somente sobre parte da rede, e não sobre toda a rede, o que reduz a sobrecarga de pacotes de controle.

Um exemplo de esquema hierárquico é a própria estrutura hierárquica de roteamento da Internet, que tem sido utilizada nas redes cabeadas por muitos anos.

Nos **esquemas assistidos por posicionamento geográfico**, todos os nós devem estar equipados com o Sistema de Posicionamento Global (GPS – *Global Positioning System*). Esta exigência é factível hoje em dia, pois esse tipo de equipamento já se encontra disponível e a custos razoáveis, permitindo a localização de um equipamento com precisão de poucos metros. São providos, também, de *tempo universal* que permite a sincronização global entre os nós equipados com GPS. As informações de localização de um nó equipado com GPS podem ser usadas para implementar roteamento direcional, permitindo melhor desempenho dos processos de roteamento em redes móveis *ad hoc*.

Um esquema de roteamento baseado em GPS é o **Roteamento e Endereçamento Geográfico** (*GeoCast – Geographic Addressing and Routing*) que permite o envio de mensagens para todos os nós de uma área geográfica específica, usando informações geográficas em vez dos endereços lógicos dos nós.

3 ROTEAMENTO EM REDES MÓVEIS AD HOC

3.1 Introdução

A tarefa de um protocolo de roteamento consiste, basicamente, em descobrir e manter caminhos entre pontos distantes em uma rede, possibilitando o encaminhamento de pacotes entre quaisquer dois nós da rede.

As funções de núcleo de rede (*backbone*), em geral, utilizam os protocolos de roteamento tradicionais já conhecidos, que implementam técnicas de roteamento denominadas **vetor de distâncias** (*distance-vector* ou *hop-by-hop*) ou **estado dos enlaces** (*link-state*), utilizados na operação das redes cabeadas.

Ao contrário deste tipo de solução, as redes móveis sem fio *ad hoc* estendem o conceito de mobilidade para permitir que domínios móveis sem fio constituídos por conjuntos de nós totalmente autônomos formem, eles mesmos, uma infra-estrutura de roteamento de rede do tipo *ad hoc*. O desenvolvimento de protocolos de roteamento para este tipo de rede tem como foco principal viabilizar o suporte a operações robustas e eficientes e, desta forma, têm que incorporar funcionalidades de roteamento nos próprios nós móveis. Esta demanda apresenta, ainda, grandes desafios para a comunicação sem fio, pois seus nós (que devem ser roteadores e estações combinadas) possuem grande limitação de recursos, principalmente, com respeito à largura de banda e à autonomia de bateria – o que torna as soluções de roteamento intrinsecamente diferentes das utilizadas nas redes infra-estruturadas.

Outro aspecto a considerar é que a população (quantidade de nós) em uma rede móvel sem fio *ad hoc* é, em geral, muito menor que a das redes cabeadas e, conseqüentemente, a escalabilidade dos protocolos de roteamento para redes sem fio de múltiplos saltos pode ser impactada por sobrecargas excessivas de mensagens de controle de roteamento causadas pelo crescimento desta população e pela mobilidade da rede.

Neste tipo de rede, os protocolos de roteamento dependem de vários fatores específicos, como: topologia, processo de inicialização da requisição, escolha dos roteadores (nós intermediários) a serem utilizados, bem como da localização dos nós. Esses fatores podem servir como heurísticas para a determinação do caminho mais rápido e mais eficiente para o nó de destino.

Como já foi visto anteriormente, quando dois nós específicos querem se comunicar e não possuem um enlace direto entre si, a comunicação entre ambos depende dos serviços de encaminhamento providos pelos **nós intermediários**, também denominados **nós de salto** (*hop nodes*), responsáveis pelo encaminhamento dos pacotes entre origem e destino. Como os **nós de salto** também podem se mover livremente, o caminho de roteamento considerado ótimo no momento do encaminhamento de um pacote pode conter nós de salto que não farão parte do caminho de roteamento ótimo no momento seguinte. Ainda, num dado instante, pode até não existir caminhos entre aqueles mesmos dois nós de origem e de destino.

Isto deixa bem clara a diferença de exigência entre os protocolos de roteamento neste novo cenário e no das redes cabeadas.

Nos itens seguintes são discutidos os principais protocolos referenciados na **Figura 1**, apresentada no Capítulo 2.

3.2 Protocolos de Roteamento Pró-ativos

Os protocolos de roteamento pró-ativos possuem uma característica em comum: as informações de roteamento são trocadas permanentemente entre os nós da rede, independentemente da ocorrência de requisições. Esse tipo de protocolo tem propriedades que são muito importantes para aplicações de tempo real ou que exijam garantia de QoS, tais como monitoração da rede, acesso a rotas de baixa latência e suporte a caminhos alternativos de QoS.

Um exemplo desse tipo de protocolo é o **DSDV** (*Destination-Sequenced Distance Vector* – **Vetor de Distâncias de Destino em Saltos**) que implementa uma melhoria na técnica tradicional de vetor de distâncias para garantir a inexistência de **laços** (*loops*):

- Para evitar a ocorrência de laços, cada rota é marcada com um **número de seqüência** fornecido pelo nó de destino.
- Para manter a consistência das rotas, as atualizações da tabela de rotas são transmitidas periodicamente (protocolo pró-ativo).
- No caso de existir mais de uma rota para um mesmo destino, é escolhida a rota com o número de seqüência mais recente.

- No caso de existir mais de uma rota com o mesmo número de seqüência é escolhida a de menor “custo”¹¹.

A figura abaixo mostra um exemplo contendo a tabela de rotas do nó **a**:

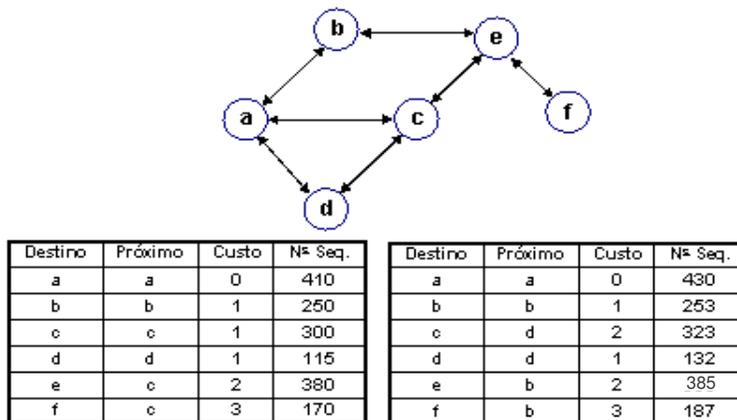


Figura 2: DSDV – Atualização da tabela de rotas do nó **a**, com a queda do enlace a-c.

3.2.1 Protocolo *Wireless Routing Protocol* (WRP)

O **Protocolo de Roteamento Sem Fio (WRP)** [Lee, 2003] é um protocolo do tipo **Vetor de Distâncias (DV – Distance Vector)**, em que a distância entre dois nós é computada pelo número de *saltos* necessários para alcançar o nó de destino.

3.2.1.1 Descrição

O WRP aperfeiçoa os protocolos de roteamento do tipo DV tradicionais de três formas complementares:

a) **Mudança de topologia:**

- Se não houver alteração no estado dos enlaces, envia periodicamente apenas um pacote HELLO, de controle.

¹¹ Conforme já foi visto, esse “custo” é calculado, normalmente, em termos da distância (nº de enlaces a serem percorridos) para se alcançar o nó de destino. Na figura 2, o custo para se ir do nó **a** até o nó **e** é igual a 2.

- Se perceber alguma mudança de topologia, envia somente as “tuplas” que refletem a mudança (e não toda a tabela de rotas), contendo: ID (identificador) do nó de destino, distância e ID do nó predecessor (penúltimo salto).

b) Confirmação de recebimento:

- É obrigatório o envio das mensagens de atualização (ACK), pelos vizinhos;
- São feitas retransmissões em caso de *timeout*¹²;
- Esta otimização garante maior confiabilidade dos processos de atualização de rotas;

c) Determinação de caminhos:

- É obrigatório o envio do ID do nó predecessor, para permitir o cálculo do caminho completo da origem até o destino, de forma recursiva.

3.2.1.2 Análise do Protocolo

- Reduz as situações de laço (*loop*), em que um pacote pode passar por um mesmo nó mais de uma vez;
- Acelera a convergência dos processos de manutenção das informações de roteamento;
- É menos propenso ao problema de contagem até infinito;
- Se existirem nós altamente móveis, as mensagens de atualização serão disparadas frequentemente.

3.2.2 Protocolo *Fisheye* (FSR)

O protocolo **Olho de Peixe**¹³ é um protocolo de roteamento simples e eficiente, do tipo **Estado de Enlace** ou **LS** (*Link State*) [Lee, *op. cit.*] em que cada nó mantém um mapa da

¹² *Timeout* – intervalo de tempo que o nó de origem aguarda pela chegada da confirmação (ACK) do recebimento, a ser enviada pelo nó de destino.

¹³ A escolha do nome deste protocolo é uma analogia ao fato de que a visão dos peixes apresenta maior abertura angular, possibilitando maior amplitude da visão (visão de 360°). Hafeth Hourani, em sua apresentação

topologia da rede em cada nó e propaga as atualizações dos estados dos enlaces. Permite associar “custos” aos caminhos, que são calculados de acordo com atributos do tipo: capacidade do enlace, congestionamento etc.

3.2.2.1 Descrição

As principais diferenças entre o protocolo FSR e o LS convencional se referem à forma de propagação da informação de roteamento, que é mais aperfeiçoada no FSR:

a) Otimização do processo de troca de informações de LS:

- Não faz inundação de informações de controle LS (LSI – *Link State Information*);
- A troca de informação completa de LS é feita apenas com seus vizinhos.
- A tabela de estado dos enlaces se mantém atualizada pelas informações recebidas dos vizinhos;

b) Inundação de LSI é disparada por tempo e não por evento:

- A inundação de LSI é disparada por tempo (periódica) e não por eventos, como por exemplo, na ocorrência da queda de algum enlace;
- Desta forma, evitam-se atualizações frequentes em um ambiente móvel com enlaces sem fio pouco confiáveis;

c) O tempo de disparo é variável:

- Usa intervalos de disparo diferentes para cada tipo de entrada na tabela;
- A difusão de LSI é feita em intervalos de disparo diferentes, de acordo com o número de saltos necessários para alcançar o nó de destino;
- Para os nós mais distantes, fora de um escopo pré-definido, a propagação de LSI é feita em intervalos de tempo maiores.

3.2.2.2 Análise do Protocolo

- Não faz inundação em toda a rede;

na Universidade de Tecnologia de Helsinki em 12/03/04, sobre o artigo [Hong, 2002], mostrou duas imagens em 360° para ilustrar a idéia do algoritmo FSR (<http://www.tcs.gyt.fu/Studies/T-79.300> (Acessada em 21/04/04)).

- Reduz o tamanho dos pacotes de controle e a frequência das propagações, em relação aos protocolos LS tradicionais;
- A troca de LSI é pequena mesmo em redes grandes;
- Se a mobilidade cresce, as rotas para destinos mais remotos podem se tornar menos precisas, já que a propagação de LSI é mais lenta para esses nós.
- Esta ineficiência na determinação precisa do caminho para os nós mais distantes não é, entretanto, muito relevante porque, à medida que o pacote vai se aproximando de seu destino, o caminho a ser percorrido vai sendo ajustado pelo conhecimento mais acurado, registrado nos nós intermediários mais próximos do destino.

3.2.2.3 Variante do Protocolo FSR

Um protocolo semelhante ao FSR é o **Estado de Enlace de Alcance Difuso** (*FSLS – Fuzzy Sighted Link State*) [Hong, 2002a]. Inclui um algoritmo ótimo denominado **Estado de Enlace de Alcance Nebuloso** (*HSLs – Hazy Sighted Link State*), que implementa um método algébrico de determinação dos tempos de disparo das inundações de LSI a cada intervalo de $2^k \cdot T$ para um escopo de 2^k , onde k é a distância máxima em saltos na rede e T é o período mínimo de transmissão de LSI.

A fórmula utilizada demonstra, claramente, o propósito deste algoritmo em garantir que informações de LSI mais precisas sejam encaminhadas aos nós mais próximos, pois quanto menor a distância k em saltos, menor é o período de transmissão de LSI.

3.2.3 Protocolo *Optimized Link State Routing* (OLSR)

O protocolo de **Roteamento de Estado de Enlace Otimizado** (*OLSR – Optimized Link State Routing*) [Hong, *op. cit.*] é um protocolo de LS, que troca, periodicamente, informações de topologia com outros nós na rede.

3.2.3.1 Descrição

Utiliza retransmissões multiponto (*MPRs – MultiPoint Relays*), para reduzir o número de transmissões desnecessárias (redundantes) de pacotes de difusão e, como será visto mais

adiante, também o tamanho dos pacotes de LSU, garantindo maior eficiência do processo de inundação de mensagens de controle na rede.

Para entender o processo de construção dos conjuntos MPR de nós vizinhos, considere a rede mostrada na figura 3 abaixo, em que o nó **A**, periodicamente, envia mensagens de difusão do tipo **HELLO** para todos os seus vizinhos imediatos para trocar informações de vizinhança (i.e., sua **Lista de Vizinhos**) e para calcular seu conjunto **MPR**. Da sua lista de vizinhos, o nó **A** determina os nós que estão a dois saltos de distância e calcula o conjunto mínimo de nós vizinhos imediatos (pontos de latência de um salto) requeridos para alcançar **todos** os vizinhos de dois saltos. Tal conjunto é seu conjunto **MPR**. O conjunto **MPR** do nó **A**, conforme apresentado em [Hong, *op. cit.*], é constituído pelos nós **E**, **F** e **G**.

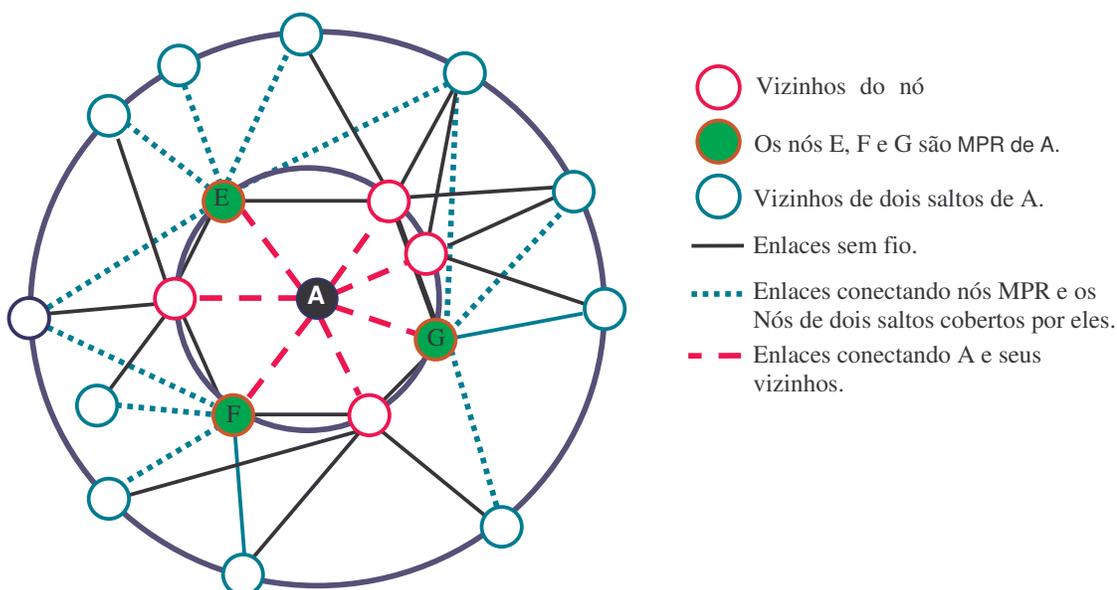


Figura 3: OLSR – Uma ilustração de Retransmissões Multiponto

Como a determinação do conjunto **MPR** ótimo (de tamanho mínimo) é NP-completo¹⁴, são usadas heurísticas eficientes para determinar o conjunto **MPR**.

¹⁴ Um problema é dito ser *NP-Completo* quando é demonstrado, formalmente, que não existe um algoritmo **determinístico** para resolvê-lo. Neste caso, o uso de heurísticas pode permitir a obtenção de soluções de complexidade (em termos de tempo de processamento e de eficiência da solução) aceitáveis.

Cada nó informa a seus vizinhos sobre seu conjunto MPR na mensagem HELLO. Uma vez recebido este HELLO, cada nó guarda os nós (chamados *seletores* MPR) que o selecionam como um de seus MPRs.

Na disseminação de informações de roteamento, o OLSR difere dos protocolos LS puros em dois aspectos:

- a) Primeiro, pela forma de construção, somente os nós MPR de A precisam encaminhar as atualizações de LS descobertas por A.
- b) Segundo, a atualização de LS do nó A é reduzida em tamanho já que ela inclui somente os vizinhos que selecionam o nó A como um de seus nós MPR. Desse modo, é propagada uma informação de topologia parcial, isto é, digamos que o nó A pode ser alcançado somente a partir de seus próprios seletores MPR.

3.2.3.2 Análise do Protocolo

O algoritmo utilizado melhora o desempenho de um protocolo LS ao identificar, para cada nó i da rede, o conjunto mínimo de nós MPR de vizinhos para os quais serão enviadas informações de controle. Como esse processo é repetido em cada nó, o tráfego de controle da rede pode ser muito menor que no caso do LS tradicional.

O OLSR calcula o menor caminho para um destino arbitrário usando o mapa de topologia consistindo de todos os seus vizinhos e dos nós MPRs de todos os outros nós. É particularmente eficiente em redes densas. Quando a rede é esparsa, todo vizinho de um nó se torna um de seus nós MPR, de tal maneira que o OLSR passa a se comportar exatamente como um protocolo LS puro.

3.2.4 Protocolo *Topology Broadcast Base with Reverse Path Forwarding* (TBRPF)

O protocolo **Base de Difusão de Topologia com Encaminhamento pelo Caminho Reverso** (*TBRPF – Topology Broadcast Base with Reverse Path Forwarding*) é também um protocolo LS [Hong, 2002a], que provê roteamento salto-a-salto ao longo de caminhos de número mínimo de saltos para cada destino.

3.2.4.1 Descrição

Cada nó calcula uma árvore de origem que provê caminhos para todos os nós alcançáveis da rede, baseado em informação de topologia parcial armazenada em sua tabela

de topologia, usando uma modificação do algoritmo de Dijkstra. Para minimizar a sobrecarga de controle, cada nó informa somente parte de sua árvore de origem aos vizinhos, ao contrário de outros protocolos, como o OSPF usado nas redes tradicionais interconectadas à Internet, que transmite a árvore de origem completa para seus vizinhos de um salto. O TBRPF usa uma combinação de atualizações periódicas e diferenciais para deixar todos os vizinhos informados das atualizações. Se um enlace é usado por um vizinho para formar sua árvore de menor caminho, esse enlace será escolhido para as atualizações periódicas. Cada nó pode também reportar informações adicionais de topologia, e até mesmo a topologia completa, para garantir redes móveis mais robustas. O TBRPF faz a descoberta dos vizinhos usando mensagens HELLO “diferenciais” que informam somente as alterações ocorridas no estado dos enlaces para os vizinhos (ativo ou perdido). Isto resulta em mensagens HELLO menores que aquelas utilizadas em outros protocolos de roteamento do tipo LS como o OSPF e o OLSR.

Consiste de dois módulos separados: o primeiro é o **Módulo de Descoberta de Vizinhos**, denominado **TND** (*T Neighbor Discovery*), e o segundo é o **Módulo de Roteamento**. O TND é que opera através do envio de mensagens HELLO “diferenciais” periódicas com seus vizinhos, informando somente as mudanças de estado dos enlaces (ativo ou perdido). O Módulo de Roteamento opera baseado em informação parcial de topologia, obtida através de atualizações periódicas e diferenciais de topologia.

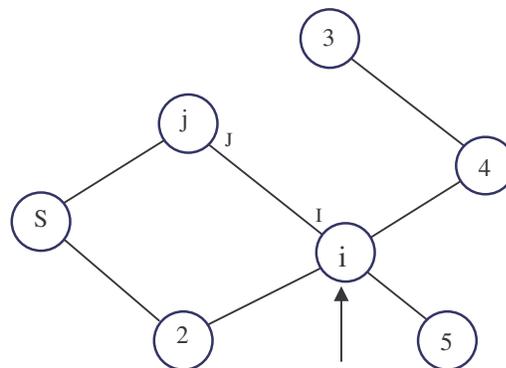


Figura 4: TBRPF – Uma única interface I, do nó i, pode ouvir mais de um feixe de transmissão originada no mesmo nó j.

Observe que em redes sem fio, é possível que uma única interface simples I receba pacotes de múltiplas interfaces J associadas com o mesmo nó vizinho. Isto pode ocorrer, por exemplo, se o vizinho usar uma antena direcional com diferentes interfaces representando

diferentes feixes de transmissão. Por esta razão, o TBRPF inclui endereços de interface de vizinho nas mensagens HELLO, ao contrário do OSPF, por exemplo, que inclui somente os IDs do roteadores nos pacotes HELLO.

Cada nó TBRPF mantém uma tabela de vizinhos para cada interface local **I**, para conter informações de estado relativas a cada interface **J** de vizinho, percebida por **I**. Isto é, para cada enlace (I, J) entre a interface **I** e uma interface de vizinho **J** é criada uma entrada na tabela de vizinhos de **I**. O estado de cada enlace pode ser **unidirecional** (*I-Way*), **bidirecional** (*2-Way*) ou **perdido** (*Lost*). A tabela de vizinhos da interface **I** determina o conteúdo das mensagens HELLO enviadas pela interface **I**, e é atualizada com base nas mensagens HELLO recebidas pela interface **I** (e possivelmente através de notificações da camada de Enlace).

Cada nó TBRPF envia (em cada interface) pelo menos uma mensagem HELLO por **HELLO_INTERVAL**. Cada mensagem HELLO contém três (possivelmente vazias) listas de endereços de interfaces de vizinhos, que são formadas por três subtipos de mensagens: *Neighbor Request*, *Neighbor Reply* e *Neighbor Lost*. Cada mensagem HELLO contém ainda o número de seqüência corrente de HELLO ($HSEQ$), que é incrementado em cada transmissão de HELLO.

Assuma que a interface **I** pertence ao nó **i**, e a interface **J** pertence ao nó **j**. Quando o nó **i** muda o estado de um enlace (I, J), ele inclui o endereço da interface de vizinho **J** na lista apropriada (*Request/Reply/Lost*) em, no máximo, **NBR_HOLD_COUNT** (tipicamente 3) HELLOs consecutivos enviados pela interface **I**. Isto garante que o nó **j** receberá, ainda, um desses HELLOs pela interface **J**, ou perderá todos os **NBR_HOLD_COUNT** HELLOs e assim declarará que o enlace (J,I) foi perdido (*Lost*).

Para entender como o TBRPF opera, imagine que o nó **S**, conforme mostrado na figura 5, seja a origem das mensagens de atualização. Todo nó **i** na rede escolhe seu próximo salto (digamos, nó **p**) em seu caminho de menor número de saltos em direção a **S** como sendo seu **nó pai** com respeito a **S**. Em vez de inundar toda a rede, o nó **i** somente propaga as atualizações de LS (mensagens HELLO), originadas no nó **S**, se encaminhadas por seu nó pai (**p**) e retransmite-as, então, para seus filhos relativos a **S**. Mais ainda, somente as informações relativas aos enlaces que resultarem em mudanças na árvore de origem de **i** é que serão incluídas por **i** em suas mensagens de atualização.

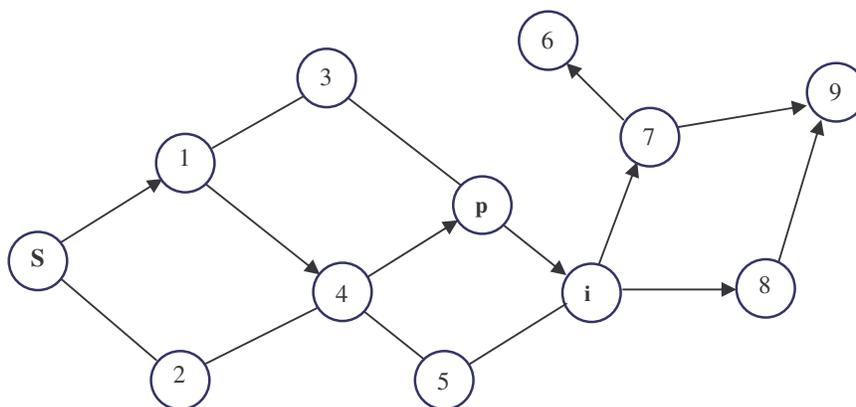


Figura 5: TBRPF - o nó **p** é o pai do nó **i**, no caminho de propagação a partir do nó **S**.

3.2.4.2 Análise do Protocolo

O algoritmo utilizado reduz o tráfego de controle ao estabelecer que um nó só propaga as mensagens de controle relativas a uma rota informada anteriormente por um certo nó **S**, se a informação de atualização tiver sido encaminhada pelo seu nó pai em relação a **S**.

Como ele consiste de dois módulos separados **de Descoberta de Vizinhos** e de **Roteamento**, é possível experimentar outros algoritmos de descoberta de vizinhos que façam uso de recursos de localização, por exemplo, compondo-o com o módulo de roteamento, para ajustar seu desempenho de forma a melhor atender a um cenário específico.

3.3 Protocolos de Roteamento Reativos

Roteamento por demanda (*on-demand*) é uma nova filosofia de roteamento que tem surgido em discussões sobre redes *ad hoc*. Ao contrário do roteamento pró-ativo, no roteamento por demanda nenhuma atividade de roteamento e nenhuma informação permanente de roteamento é mantida nos nós da rede, caso não esteja havendo comunicação na rede. Esta característica torna esse tipo de protocolo uma solução mais escalável para redes *ad hoc* com muitos nós, embora introduza um retardo inicial pela necessidade de buscar uma rota para o nó de destino, antes que possa transmitir-lhe pacotes de dados.

3.3.1 Protocolo *Ad hoc On-demand Distance Vector routing* (AODV)

O protocolo de **Roteamento de Vetor de Distância Por Demanda para redes Ad hoc** (*AODV – Ad hoc On-demand Distance Vector routing*) é um protocolo do tipo reativo e é referenciado em [Perkins, 1998] e [Castanheda, 1999], sendo um dos protocolos mais

discutidos em publicações técnicas sobre redes móveis *Ad hoc*, em razão de alguns problemas detectados em sua concepção original e de algumas melhorias propostas posteriormente, além de ser este um dos protocolos já padronizados pelo IETF (RFC 3561). Várias implementações do AODV foram desenvolvidas como parte de projetos de pesquisa e podem ser obtidas através da Internet¹⁵. Outros protocolos de roteamento (DSR, OLSR, TORA, ZRP e MMRP) podem também ser obtidos a partir desta mesma referência.

3.3.1.1 Descrição

No protocolo AODV, cada nó mantém uma rota apenas para os destinos correntemente ativos e uma rota é mantida apenas se for prevista sua utilização para iniciar ou repassar tráfego para aquele destino, num futuro próximo;

Um registro de rota para um nó **d** contém:

- **next_d**: próximo nó no caminho para **d**;
- **hops_d**: distância em hops até **d**;
- **seqno_d**: último número de seqüência registrado para **d**;
- **lifetime_d**: tempo de vida para que a rota expire;

Cada nó mantém seu próprio **número de seqüência (seqno)**, que permite descobrir ocorrências de mudanças de topologia:

- Esse **seqno** é incrementado sempre que o conjunto de vizinhos for alterado;
- Uma rota para **d** é registrada com o número de seqüência de **d**, no instante em que a rota é descoberta.
- Os nós distinguem as rotas válidas ou obsoletas pelos seus respectivos números de seqüência.
- Para falar com **d**, o nó **s** envia um **RREQ** para todos os seus vizinhos:
RREQ (hops_to_src, brdcst_id, seqno, s, src_seq_no), onde:
 - **hops_to_src**: distância do nó origem até **s** (**0**);

¹⁵ <http://encyclopedia.thefreedictionary.com/Ad%20hoc%20protocols%20implementations> (acessado em 22/04/2004)

- **brdcast_id**: ID de *broadcast* de **s**;
 - Permite identificar cópias do **RREQ**;
 - É incrementado a cada novo **RREQ** enviado para **s**.
- **seqno**: o menor número de seqüência de uma rota para **d**, que **s** aceita;
 - Geralmente, é igual ao último **seqno_d** guardado por **s**;
- **s**: nó que está enviando o **RREQ**;
- **src_seq_no**: número de seqüência do nó que iniciou o **RREQ**.

3.3.1.2 Processamento do RREQ nos Nós Intermediários

Ao receber um **RREQ**, um nó **t**:

- Se a nova rota para **d** tem **seqno** maior, reenvia o **RREQ**, incrementando o campo **hops_to_src**;
- Usa o **RREQ** recebido para criar uma rota reversa para **s**, a ser usada, eventualmente, para **RREP**;
- Se o nó **t** tem uma rota atual para **d**, envia esta rota para **s**:
RREP(**hops_d**, **d**, **seqno_d**, **lifetime_d**)
- Se **t = d** (i. e., se **t** é o próprio nó **d** de destino), ele envia para **s**:
RREP(**0**, **d**, **big_seq_no**, **my_route_timeout**), onde:
 - **big_seq_no** = MAX (**seqno_d**, **seqno_do_RREQ**)
 - **my_route_timeout**: temporizador (*timer*) padrão de **d**.

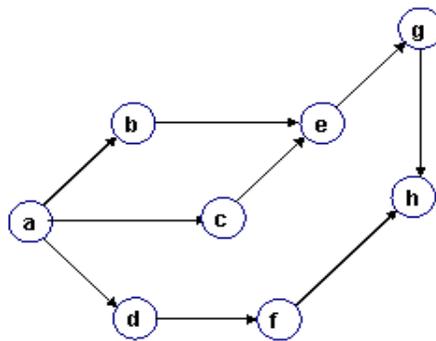


Figura 6: AODV – Propagação de RREQ, enviado pelo nó **a**, para o destino **h**

3.3.1.3 Processamento do RREP nos Nós Intermediários

- Um nó **q**, ao receber um **RREP** para **d**:
 - Atualiza sua própria rota para **d**, se seu **seqno** for menor;
 - Se for o mesmo **seqno**, escolhe a “menor” rota;
 - Incrementa o número de saltos e reenvia o **RREP** para **s** pelo caminho reverso para **d**.

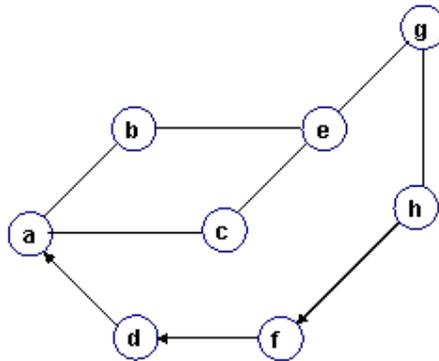


Figura 7: AODV – Envio de resposta (*Route Reply*) à requisição de rota, do nó **h** para o nó **a**

3.3.1.4 Manutenção de Rotas

Todo nó **s** guarda seus **vizinhos ativos** para cada nó **d** (ativo). Nós **vizinhos ativos** são os nós cujo $next_d = s$;

- Se **s** detecta a quebra de sua rota para **d**:
 - Envia um **RREP** não solicitado através de todos os seus vizinhos para o nó **d**:
RREP ($255, d, seqno_d+1, lifetime_d$)
- Se o **tempo de vida** (*lifetime*) de uma rota expira:
 - A rota é marcada como inválida;
 - $hop_count = 255$;
 - $lifetime_d = BAD_LINK_LIFETIME$ (valor constante).

A rota pode ser ainda atualizada ou substituída, mesmo já tendo sido marcada como inválida;

Se o **tempo de vida** de uma rota marcada como inválida expirar, a rota é marcada como *apagável*.

3.3.1.5 Análise do Protocolo

O algoritmo utilizado reduz o tráfego de controle de várias formas complementares:

- Mantém rotas apenas para os destinos ativos;
- Cada nó mantém seu próprio **número de seqüência** que é enviado em todas as informações de controle (RREQ e RREP) e é incrementado a cada alteração em seu conjunto de vizinhos:
 - Os nós distinguem as rotas válidas ou obsoletas pelos respectivos números de seqüência.
- Os nós intermediários processam os RREQs recebidos de acordo com seu número de seqüência;
- Se um nó intermediário receber uma requisição de rota para um dado nó **d**, e já conhece uma rota para **d**, ele próprio responde ao requisitante sem necessidade de retransmitir o RREQ, reduzindo o tráfego de controle na rede.
- Ainda, ao detectar a quebra de sua rota para um nó **d**, qualquer nó pode enviar um **RREP** não solicitado para todos os seus vizinhos.

3.3.2 Protocolo *Dynamic Source Routing* (DSR)

O protocolo de **Roteamento de Origem Dinâmico** (*DSR – Dynamic Source Routing*) é um protocolo do tipo **Por-Demanda** (*On-Demand*), **com roteamento na origem** (*Source Routing*) [Hong, 2002a].

3.3.2.1 Descrição

Neste protocolo as rotas são obtidas apenas quando houver pacotes de dados a serem transmitidos e o nó de origem deve descobrir todo o caminho até o nó de destino, antes que possa enviar-lhe seus pacotes de dados:

- Cada nó mantém uma *cache* das rotas que aprende, ao longo do tempo;

- A cada rota é associado um tempo de vida (*Time To Live*) e, se não for atualizada periodicamente, expira;
- O uso de uma **キャッシング** agressiva ajuda a minimizar o custo decorrente do processo de descoberta de rotas.
- O nó de origem insere, no cabeçalho do pacote de dados, a lista dos IDs dos nós do caminho, para que os nós intermediários saibam qual é o caminho a ser seguido pelo pacote;
- Quando um nó **a** tiver um pacote de dados para enviar para o nó **h**:
 - Ele verifica se já possui a rota em sua **cache de rotas** (*Route Cache*);
 - Se ainda não conhece a rota, dispara um **RREQ: RREQ(a, h, {a})**
- Ao receber o **RREP** em resposta ao seu **RREQ**, o nó **a** atualiza seu **cache**.

3.3.2.2 Descoberta de Rotas

- Se o nó de origem não conhece um caminho para o nó de destino, ele inunda a rede com uma **Requisição de Rota** (*Route Request*): **RREQ(a, h, {a})**;
- Se um nó intermediário **i** não conhece a rota para o destino, ele ajusta o **RREQ** e dispara outro **RREQ: RREQ(a, h, {a, i})**.
 - O pacote **RREQ** guarda os **IDs** dos nós por onde passa.
- Ao chegar ao destino (ou a um nó que já conhece um caminho para o destino), este envia uma **Resposta à Requisição de Rota** (*Route Reply*) pela rota gravada no **RREQ**:
 - Se algum nó intermediário **i** conhece uma rota para o destino, este envia uma **RREP** para o nó **a** de origem, informando a rota: **RREP(i, a, {rota})**
- Para limitar a propagação dos **RREQs**, um nó só processa o **RREQ**, se seu próprio **ID não constar** da rota recebida no **RREQ**.

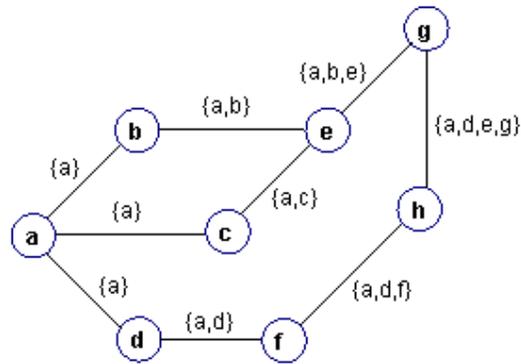


Figura 8: DSR – Exemplo de propagação de pacotes de controle RREQ

3.3.2.3 Manutenção de Rotas

- Não requer o envio de nenhuma mensagem periódica;
- Ao determinar que uma rota está obsoleta, o nó envia um **Erro de Rota** (*Route Error*) para o nó de origem;
- O nó de origem inicia um novo processo de descoberta de rota;

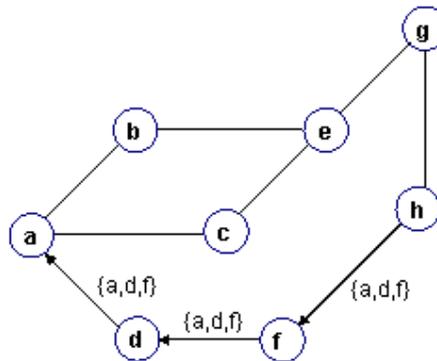


Figura 9: DSR – Exemplo de propagação de pacotes de controle RREP

3.3.2.4 Análise do Protocolo

No artigo [Obradovic, 2000] é proposta uma otimização do protocolo **DSR**, denominada *packet salvaging*, que consiste em guardar múltiplas rotas entre quaisquer pares de nós origem e destino e utilizar essas rotas alternativas para reduzir a necessidade de descoberta de novas rotas e a conseqüente perda de pacotes de dados, decorrente do descarte de pacotes de dados quando ocorre a indisponibilidade de enlaces. Esta otimização é abordada com mais detalhes no item 3.5.2, no estudo do protocolo DREAM.

3.3.3 Protocolo *On-Demand Link VECtor* (OLIVE)

Soumya Roy, em sua Tese de Doutorado (*PhD Thesis*) [Roy, 2003], discute o algoritmo de **Roteamento Adaptativo Por Demanda** (*SOAR – On-demand Adaptive Routing*) e propõe um novo protocolo de roteamento, denominado **Vetor de Enlace Por Demanda** (*OLIVE – On-Demand Link Vector protocol*), que previne a ocorrência de **laços** (*loops*) temporários para um dado destino pela sincronização, entre nós vizinhos, das informações relevantes de estado dos enlaces.

3.3.3.1 Descrição

O algoritmo **OLIVE** proposto consiste em se determinar o menor caminho, dentre os caminhos possíveis válidos, com as restrições da técnica de roteamento por demanda (*On-demand*). Os anúncios de caminhos são combinados para formar um **grafo** e não uma **árvore**, no nó de origem das mensagens de requisição de rota.

O objetivo do algoritmo proposto é estabelecer a rota correta em cada nó, para encaminhamento dos pacotes na forma **salto-a-salto** (*hop-by-hop*).

Nos algoritmos de seleção de caminho utilizados pelos protocolos de roteamento de LS por demanda, cada nó divulga **apenas** os enlaces necessários para o encaminhamento dos pacotes.

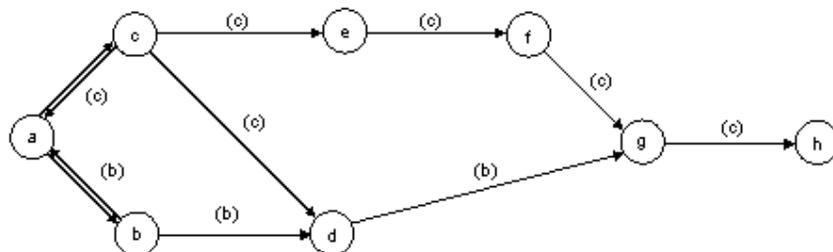


Figura 10: No roteamento LS por demanda cada nó divulga apenas os enlaces necessários ao encaminhamento dos pacotes

3.3.3.2 Detalhes do Algoritmo OLIVE

Este algoritmo deve atender às seguintes regras:

Seja $p_i^j(\mathbf{k}) \rightarrow$ caminho para j a partir de i , e através de \mathbf{k} :

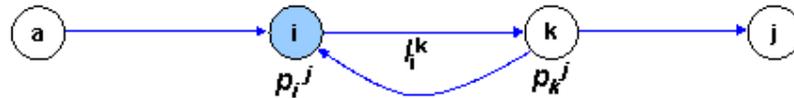


Figura 11: Caminho de i para j através de k , sendo k um vizinho imediato de i , no caminho para j .

Regra 1: Se $\exists p_i^j(k)$, então $p_i^j(k) = [i \ k \ p_k^j]$, i. e., k reportou a i o caminho p_k^j , alcançável através do enlace l_i^k ;

Regra 2: Podem existir vários caminhos de i para j ;

Regra 3: Apenas o menor caminho será escolhido.

Este algoritmo apresenta as seguintes etapas principais:

Etapa 1: Encontrar os caminhos válidos;

Etapa 2: Selecionar as melhores rotas.

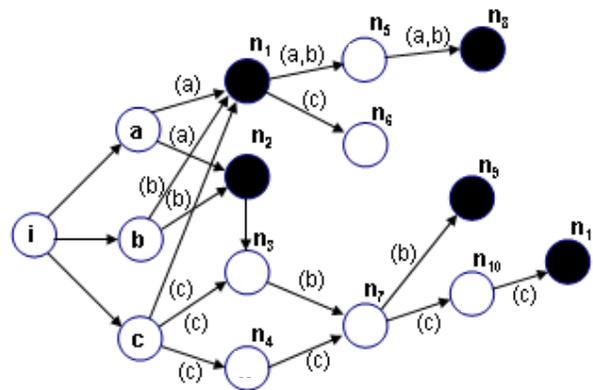


Figura 12: OLIVE – Topologia Parcial determinada pelo nó i .

O artigo [DU, 2003] afirma que os algoritmos de *Dijkstra* ou de *Bellman-Ford* não podem ser usados diretamente para selecionar os caminhos mais curtos em roteamento por demanda de estado de enlaces porque eles não satisfazem à Regra 1, acima. Esta limitação ocorre porque os algoritmos tradicionais de determinação de caminhos mais curtos operam corretamente apenas quando **todos** os nós mantêm rotas para **todos** os destinos possíveis. Nos protocolos de roteamento por demanda, entretanto, os nós só estão interessados em rotas para os nós para os quais eles têm dados a transmitir e, conseqüentemente, os algoritmos de *Dijkstra* ou de *Bellman-Ford* não podem ser diretamente aplicados para a determinação de rotas, devido às limitações impostas pelo roteamento por demanda em que um vizinho pode

ser escolhido como sendo o próximo salto para um determinado destino somente se aquele vizinho tiver notificado um caminho para referido destino.

No Capítulo III de sua Tese, Soumya Roy apresenta os detalhes do algoritmo **OLIVE** que, após determinar os caminhos válidos para um dado destino (Etapa 1), encontra o caminho de custo mínimo entre as possíveis opções e seleciona os caminhos que são de menor custo, com base nos grafos de origem dos vizinhos **a**, **b**, **c**. Etapa 2 apresentada na figura 13, à direita.

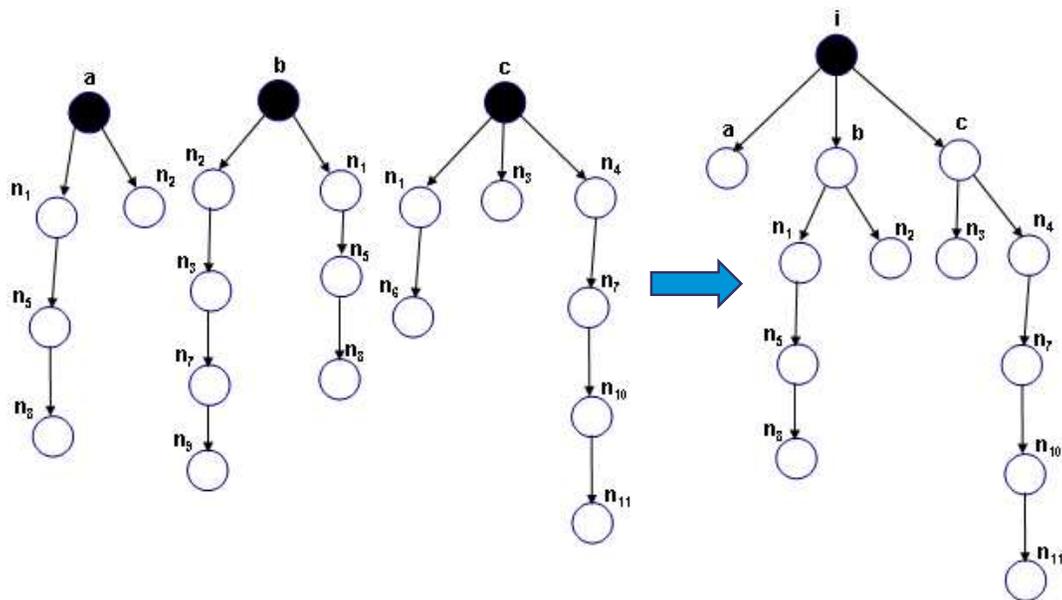


Figura 13: OLIVE: Grafos de origem dos vizinhos **a**, **b** e **c**, do nó **i**, e árvore de origem final para o encaminhamento de pacotes.

3.3.3.3 Análise do Protocolo

O protocolo proposto neste artigo, denominado **OLIVE**, é um protocolo do tipo por demanda que se baseia no estado dos enlaces e faz encaminhamento de pacotes no esquema salto-a-salto (*hop-by-hop*). Implementa um novo algoritmo de seleção de caminho que permite a determinação dos melhores caminhos, dentre os reportados pelos nós da rede.

O processo de junção das árvores dos nós vizinhos da origem para determinar a árvore resultante do nó de origem exige um estudo teórico que foge ao objetivo do presente trabalho, podendo ser consultado diretamente em [Roy, op. cit.].

3.4 Protocolos de Roteamento Hierárquico

Nos casos de redes sem fio com alta taxa de crescimento em seu número de nós, os esquemas de roteamento anteriores podem se tornar inviáveis devido à sobrecarga de processamento e de tráfego na rede decorrentes de trocas de informações de roteamento (tráfego de controle) entre seus nós.

Os protocolos hierárquicos se propõem a resolver esta questão e produzir soluções escaláveis e eficientes de roteamento. A idéia é organizar os nós em grupos e, então, atribuir funcionalidades diferentes para os nós internos ou externos a cada grupo de forma a reduzir o tamanho da tabela de roteamento e, conseqüentemente, dos pacotes de atualização de rotas, incluindo neles apenas informações de controle de parte da rede. Algumas formas de construir hierarquias seriam:

- a) Agrupar os nós geograficamente próximos em **agrupamentos** (*clusters*) explícitos. Cada **agrupamento** tem seu nó principal, denominado **cabeça de grupo** (*clusterhead*), para se comunicar com os demais nós do grupo e para fazer a ponte com o restante da rede;
- b) Criar hierarquias implícitas: neste caso, cada nó possui um **escopo local** (que seria comum a um grupo de nós), de tal forma que dentro e fora do **escopo local** possam ser utilizadas estratégias diferentes de roteamento. A comunicação entre escopos diferentes é feita através de interseções (*overlapping*) entre os escopos.

No caso dos protocolos baseados em **agrupamentos**, tem-se a seguinte tipologia de nós:

- **Cabeça de grupo** (*cluster head*) – nó especial, existindo apenas um em cada grupo;
- **Ponte** (*gateway*) – nós pertencentes a mais de um grupo;
- **Ordinários** – demais nós, internos a algum grupo e sem nenhuma função particular.

Os limites da área de um **agrupamento** são definidos pela área de transmissão (alcance) do nó **cabeça de grupo** (*cluster head*). Somente este último e os nós **ponte** (*gateways*) podem retransmitir para fora do grupo. Os nós comuns não re-encaminham nenhuma transmissão por difusão.

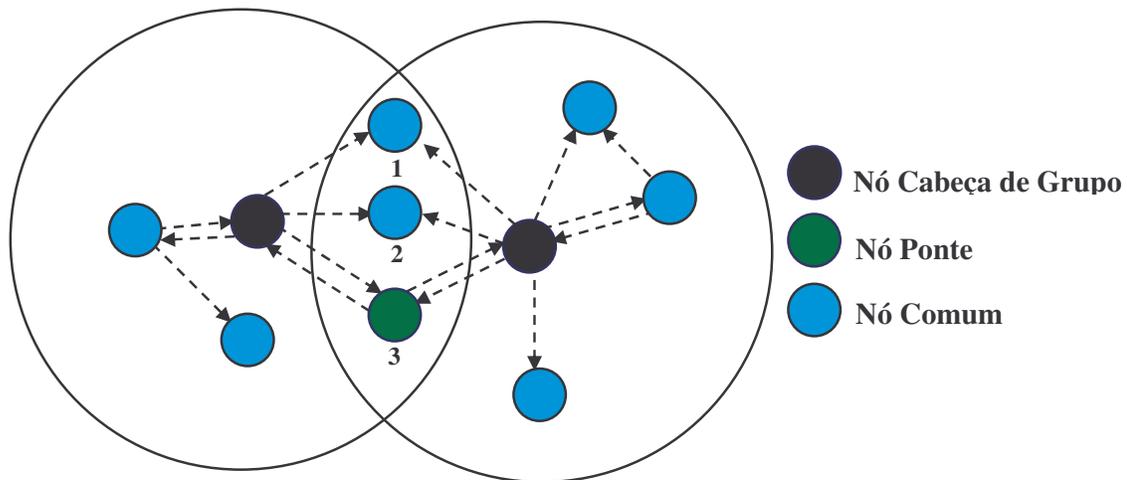


Figura 14: Exemplo de inundação eficiente com o uso de *agrupamentos de nós*.

3.4.1 Abordagem para construção dos Agrupamentos

AGRUPAMENTO ATIVO:

- Os nós cooperam para eleger o nó **Cabeça de Grupo**, trocando informações periodicamente, independentemente da transmissão dos pacotes de dados.

AGRUPAMENTO PASSIVO:

- Os nós suspendem o algoritmo de agrupamento até que o tráfego de dados comece.
- Explora o tráfego que passa pelo nó para propagar informações relacionadas ao agrupamento (estado do nó no grupo, end. IP do nó etc.)
- Coleta informações sobre vizinhos através de recepção promíscua de pacotes.
- Elimina a latência de inicialização, que é a maior sobrecarga de controle usada nos agrupamento ativos p/ coletar informações sobre os vizinhos.

Segundo Liang [2003], a coleta de informações precisas sobre vizinhos é muito difícil em redes *ad hoc* devido à entrega não confiável de pacotes, à baixa capacidade dos enlaces e à mobilidade dos nós. Assim, um esquema que trabalha somente com informação de topologia completa de vizinhos (*MPR, agrupamento ativo*) tem seu desempenho fortemente impactado pelo crescimento do número de vizinhos ou pela mobilidade dos nós, tornando ainda mais difícil manter as informações de vizinhança atualizadas.

3.4.2 Protocolo *Landmark Ad hoc Routing* (LANMAR)

O protocolo **Landmark** (balizamento) original para redes cabeadas foi proposto em [Tsu, 1988]. O protocolo de **Roteamento Ad hoc de Balizamento** (*LANMAR – Landmark Ad hoc Routing*) [Pe, 2000, *op. cit.*] adota aquele esquema para roteamento em redes *Ad hoc*, dividindo a rede em **zonas** (**sub-redes lógicas**) pré-definidas, cada uma das quais contém um nó **Baliza** (*Lanmark*) pré-selecionado. É assumido que todos os nós numa **zona** se movem em grupo e permanecem conectados entre si através do protocolo **FSR**.

3.4.2.1 Descrição

No protocolo LANMAR, as rotas para os nós **Balizas** (*lanmarks*), e conseqüentemente para suas correspondentes zonas, são mantidas pró-ativamente por todos os nós na rede, através da troca de vetores de distância (*DV*). Todo pacote de dados tem um endereço hierárquico específico de um nó de destino em seu cabeçalho. Os pacotes são então encaminhados através do nó **Baliza** (*lanmark*) da zona à qual o nó de destino pertence e esta o re-encaminha para o nó de destino, usando a tabela de roteamento de sua zona.

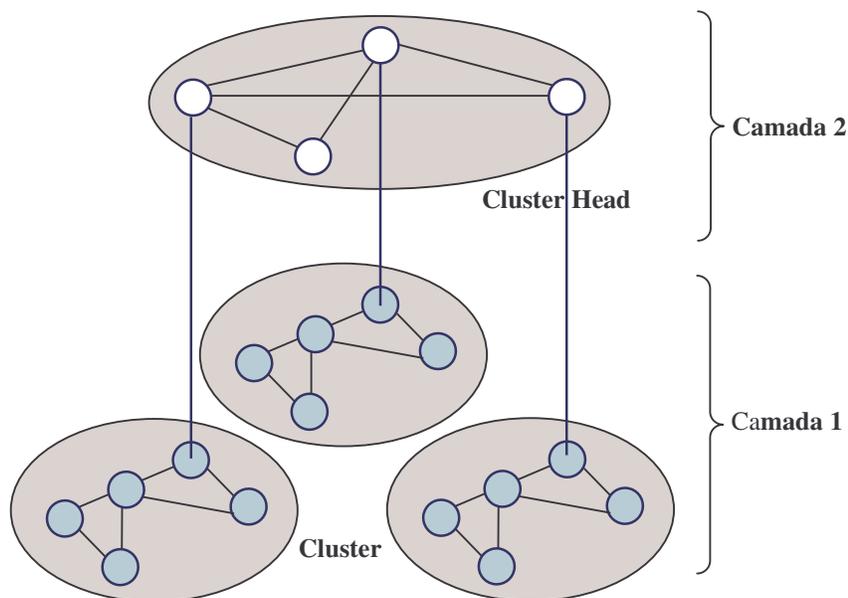


Figura 15: LANMAR - Roteamento hierárquico

3.4.2.2 Análise do Protocolo

Esta organização dos nós da rede em **grupos de nós** com alguma característica em comum (se deslocam com velocidade semelhante e numa mesma direção, estão fisicamente numa mesma região) permite estruturar a rede de forma semelhante à idéia dos **Sistemas Autônomos** utilizados no protocolo OSPF, também do tipo LS e, desta forma, o tráfego de controle com informações relativas aos nós de um mesmo grupo não precisam ser transmitidos para fora do próprio grupo e apenas os nós **Baliza** (*lanmarks*) são responsáveis por fazer o papel de **ponte** com os nós **Baliza** dos demais grupos.

Dependendo do número de nós da rede e da tipologia de movimentação e localização dos nós, pode-se criar mais ou menos grupos de forma a otimizar o tráfego de controle para requisição e atualização de rotas.

3.4.3 Protocolo Zone Routing Protocol (ZRP)

O protocolo ZRP [Moura, 2000] é um híbrido entre reativo e pró-ativo e é definido baseado em **Zonas de Roteamento**. É requerido que dentro de sua **zona** o nó conheça as informações de roteamento, utilizando algoritmos pró-ativos. Isto permite que as informações de roteamento sejam propagadas apenas localmente. Quando as informações são inter-zonas o algoritmo utilizado é do tipo *por demanda*.

3.4.3.1 Descrição

Uma **zona** é definida para o conjunto de nós que estão a uma distância mínima de saltos de um determinado nó. Na maioria das vezes, essa distância é representada por um número pré-definido, que é denominado **Raio da Zona**.

- Se o destino estiver dentro da zona do nó de origem, então
 - o pacote é imediatamente enviado, pois o nó já conhece o caminho.
- Caso contrário, ele envia o pacote através de *multicast* para todos os nós que estão na **borda da zona de roteamento**, perguntando se conhecem uma rota para o destino.
 - Os nós de borda que conhecem uma rota, enviam uma resposta afirmativa e a conexão é fechada.

- Caso nenhum nó de borda conheça uma rota, eles enviam a mensagem para os nós da borda de suas próprias zonas.
- Este procedimento se repete até que uma confirmação chegue ou que o número de saltos alcance o valor limite estabelecido.

3.4.3.2 Análise do Protocolo

Como o **ZRP** é um híbrido que utiliza algoritmos reativos e pró-ativos, ele pode retirar vantagens das duas abordagens. O roteamento pode ocorrer rapidamente em nós que estão na mesma zona, pois os caminhos já são previamente conhecidos. Além disso, o algoritmo apresenta boa escalabilidade, as mudanças na topologia são rapidamente detectadas e as tabelas de roteamento são pequenas. A desvantagem nas intra-zonas é que como o protocolo de roteamento não é especificado, várias zonas podem ter protocolos diferentes. Outra desvantagem ocorre quando há necessidade de transmitir informações inter-zonas, pois o algoritmo usado é do tipo por demanda, o que provoca um atraso decorrente da espera pela resposta de requisição de rotas.

3.5 Protocolos de Roteamento com Localização Geográfica

Segundo Hong (2002a), os avanços no desenvolvimento de GPS tornaram possível prover informação de localização com a precisão de poucos metros, além de prover um *tempo universal* (*universal timing*), que pode ser utilizado para sincronização dos nós equipados com GPS.

É evidente que o uso de informações de localização geográfica dos nós pode melhorar o desempenho dos protocolos de roteamento em redes *ad hoc*, já que permite direcionar o roteamento das mensagens. No caso de redes *ad hoc* móveis é necessário, entretanto, um cuidado especial para garantir a validade da localização informada, no momento de sua utilização.

É importante observar, ainda, que a maioria dos protocolos de roteamento georeferenciados considera que todos os nós conhecem suas posições geográficas.

3.5.1 Protocolo *Location-Aided Routing* (LAR)

Protocolo **Sob-Demanda** (*On-Demand*) com **Localização** (*GPS – Global Positioning System*) [Lee, 2003], que utiliza um algoritmo semelhante ao usado no protocolo **DSR**, complementado pelo uso de GPS para restringir a área de inundação dos pacotes **RREQ**.

3.5.1.1 Descrição

Há dois esquemas para determinar que nós devem propagar os **RREQ**:

ESQUEMA 1:

- O nó de origem determina a posição e o tamanho da área (círculo), onde o destino deve estar, que é denominada **Zona de Requisição** (*Request Zone*);
- Apenas os nós dentro da Zona de Requisição propagam os **RREQ**;
- A posição do destino é ‘conhecida’, a partir das informações armazenadas:
 - O instante de tempo em que o destino foi localizado numa determinada posição conhecida, e
 - A velocidade média de movimentação do nó de destino.
- O nó de origem inclui estas informações no **RREQ** e só os nós posicionados dentro da **Zona de Requisição** propagam os **RREQ**.

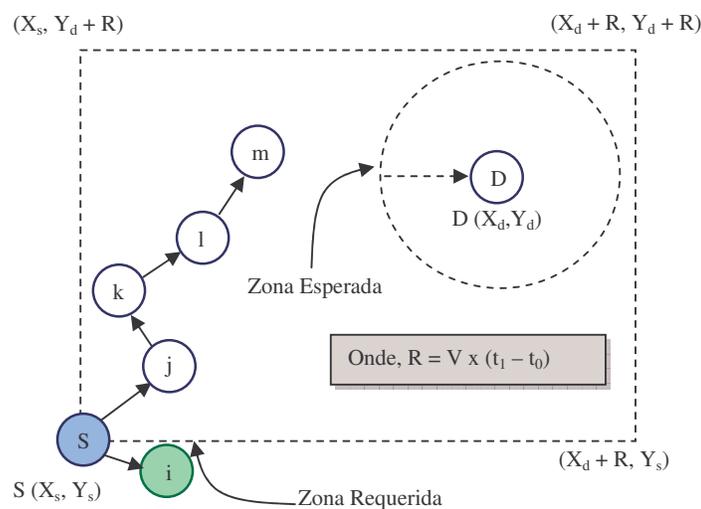


Figura 16: LAR – Propagação apenas para os nós dentro da Zona de Requisição

ESQUEMA 2:

- A origem calcula a sua distância até o destino.
- A distância e a localização do destino são incluídas num **RREQ** e enviada aos vizinhos;
- Ao receber o **RREQ** os nós calculam sua distância para o destino e continuam a retransmitir o **RREQ**, se sua distância não for maior que a indicada no **RREQ**;
- Ao retransmitir, o nó coloca sua distância até o destino no campo de distância.

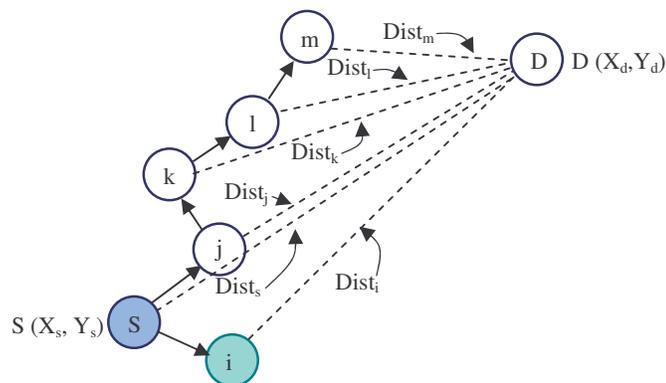


Figura 17: LAR – Cada nó recalcula sua distância até o destino p/decidir se propaga o RREQ ou não.

Se nenhum **RREP** for recebido, após um certo intervalo de tempo predefinido (*timeout*), o nó de origem reenvia o **RREQ** por inundação pura.

3.5.1.2 Análise do Protocolo

Considerando o princípio da *Localização Espacial* “quando um nó se move, ele não o faz nem para muito longe e nem tão rápido” [Castanheda, 1999], efetivamente, o protocolo **LAR** restringe a área de propagação do tráfego de controle da rede ao encaminhar mensagens apenas para nós intermediários que vão, gradativamente, se aproximando do nó de destino.

O uso de GPS, teoricamente, garantiria ao protocolo **LAR** um desempenho superior ao do **DSR**, mas isto pode depender da taxa de movimentação e do padrão de movimento dos nós de destino.

3.5.2 Protocolo *Distance Routing Effect Algorithm for Mobility* (DREAM)

O **Algoritmo de Efeito de Roteamento por Distância para Mobilidade** (*DREAM – Distance Routing Effect Algorithm for Mobility*) é um protocolo do tipo **Pró-ativo** que utiliza informações de **Localização** (*Global Positioning System*) [Hong, 2002a; Basagni, 1998].

3.5.2.1 Descrição

Este protocolo guarda as coordenadas de cada nó em uma Tabela de Localização para os outros nós, em vez dos vetores de rota, como é feito na maioria dos demais protocolos. Cada nó, periodicamente, troca mensagens de controle para informar sua localização aos outros nós. Apresenta as seguintes características principais:

- Ao requisitar uma rota para um dado nó de destino, inunda apenas os nós que estão posicionados na direção daquele nó de destino;
- Um valor de **Tempo de Vida** (*TTL – Time To Live*) é colocado nas mensagens de controle de localização, estabelecendo o tempo de validade da informação;
- As atualizações que possuem menor valor de **TTL** (*short-lived updates*) são propagadas com maior frequência (menor intervalo de tempo);
- Reduz a sobrecarga de roteamento com base em dois princípios:
 - **Efeito da distância:** quanto maior a distância entre dois nós, menor é a percepção do movimento de um nó relativamente ao outro.
 - **Taxa de mobilidade:** quanto maior for a velocidade de um nó, maior deve ser a frequência com que ele deve informar sua atualização.

3.5.2.2 Processo de Transmissão de Dados pelo Nó de Origem

- Se o nó de origem possuir informação recente da localização do nó de destino:
 - Seleciona um conjunto de vizinhos de 1 salto, na direção do nó de destino;
 - Coloca a lista desses nós no cabeçalho do pacote e o envia;
 - Dispara um temporizador (*timer*) para aguardar por um ACK e, se não recebê-lo no tempo esperado, retransmite o pacote de dados por inundação.
- Caso contrário, o dado é transmitido por inundação em toda a rede.

3.5.2.3 Processo de Retransmissão de Dados pelo Nó Vizinho

- Se este nó possuir vizinhos na direção do nó de destino:
 - Coloca a lista desses nós no cabeçalho do pacote de dados e o reenvia;
- Caso contrário, descarta o pacote.

3.5.2.4 Procedimento de Recepção de Dados pelo Nó de Destino

- Ao receber um pacote de dados, o nó de destino envia um **ACK** à origem da forma tradicional;
- Se o pacote de dados for recebido por inundação, o nó de destino não envia **ACK** para o nó de origem.

3.5.2.5 Análise do Protocolo

Este protocolo, que utiliza uma Tabela de Localização em vez das Tabelas de Rotas tradicionais da maioria dos outros protocolos, é um protocolo pró-ativo e mantém em sua tabela informações para todos os outros nós da rede. Algumas características deste protocolo são importantes para garantir uma redução do tráfego de controle:

- Cada nó só propaga requisições para seus vizinhos que se encontram na direção do destino;
- O caminho percorrido vai sendo atualizado no cabeçalho do pacote, à medida que a requisição vai se aproximando do destino, para estabelecer o caminho reverso para o encaminhamento da resposta à origem;

Por outro lado, cada nó tem a responsabilidade de enviar mensagens periódicas informando sua localização. Esta informação carrega um **tempo de validade** (TTL), que indica a validade da informação sendo informada:

- As atualizações com menor TTL são propagadas mais rapidamente;
- Nós que estão se movendo com maior velocidade informam TTLs menores.

Como se observa, este algoritmo apresenta uma redução bastante efetiva do tráfego de controle da rede, em comparação com a maioria dos outros algoritmos discutidos.

Nas simulações realizadas no artigo “*Selecting a routing strategy for your ad hoc network*” [Lee, 2003] os autores afirmam que houve a ocorrência de situações em que os pacotes de controle alcançavam o destino, mas os **ACKs** falhavam em seu caminho para o nó de origem, provocando a retransmissão das informações de controle, gerando grande congestionamento na rede. A retirada da confirmação de recebimento dos pacotes de controle melhorou o desempenho do protocolo.

3.5.3 Protocolo *Caching And MultiPath* (CHAMP)

O **Protocolo de Múltiplos Caminhos com *Caching*** (*CHAMP – Caching And MultiPath*) foi proposto por Alvin Valera et al [Valera, 2003] em seu artigo “*Cooperative Packet Caching and Shortest Multipath Routing in Mobile Ad hoc*”.

3.5.3.1 Introdução

O protocolo CHAMP implementa uma ***caching de pacotes cooperativa*** – que permite que os nós intermediários guardem um certo número de pacotes de dados por algum tempo –, e **rotas de múltiplos caminhos mais curtos** (*Shortest multipath routes*) – caminhos alternativos para um mesmo nó de destino. O autor afirma que é importante, em redes móveis *ad hoc*, prover redundância em termos de caminhos múltiplos **disjuntos**, entre os mesmos nós de origem e de destino, para melhorar a taxa de entrega de pacotes e evitar o descarte de pacotes de dados nos nós intermediários em decorrência de queda de enlaces, o que resultando na necessidade de redescoberta de rotas.

Este artigo, além de propor o novo algoritmo CHAMP, discute modificações nos protocolos AODV e DSR para que possam operar com caminhos múltiplos entre cada dois nós, e utiliza essas versões modificadas em simulações feitas com o **ns-2** (*network Simulator versão 2*) para fazer uma análise comparativa de desempenho desses três protocolos.

Conforme detalhado mais adiante, o objetivo dessa implementação é determinar **caminhos múltiplos e disjuntos de mesmo tamanho** – o artigo mostra em suas simulações que poucos caminhos podem atender às necessidades e que, à medida que aumentam as distâncias entre os nós de origem e de destino, mais cresce a probabilidade de surgirem **gargalos**, isto é, enlaces que são comuns a vários caminhos, impedindo a obtenção de caminhos efetivamente disjuntos.

Com relação ao protocolo **DSR**, para evitar descarte de pacotes de dados, é implementada a proposta de otimização sugerida por Obradovic [2000], denominada *packet salvaging*, em que:

- O nó que detecta a falha do enlace procura rotas alternativas em seu *cache de rotas*.
- Se encontrar, o pacote é enviado pelo caminho alternativo.
- Caso contrário, o pacote é descartado, não havendo garantia de não descarte de pacotes de dados, principalmente em caso de falhas frequentes de enlaces.

É proposta uma técnica denominada *cache de pacotes cooperativa*, que consiste na determinação de *rotas de múltiplos caminhos mais curtas*:

- Visando reduzir a perda de pacotes de dados devido à queda de enlaces.
- Mantendo, em cada nó, uma pequena área de memória (*buffer*) para guardar os pacotes de dados que passam através dele.

Esta *caching de pacotes cooperativa* é implementada de tal forma que quando um nó posterior (*downstream*) encontra um erro de encaminhamento, um nó anterior (*upstream*), com o pacote ainda em seu *buffer* e uma rota alternativa, pode retransmitir o dado. Para garantir esse encaminhamento, os nós devem guardar rotas alternativas para todos os *destinos ativos*.

O algoritmo **CHAMP**, para maior otimização dos processos de manutenção de rotas, utiliza ainda informações de localização (*Global Positioning System*). Antes de explicar como são utilizadas as informações de localização, é importante rever algumas propriedades associadas à implementação de *cache de memória*.

Cache é uma memória de acesso randômico, de pequena capacidade e de alta velocidade, que armazena dados para uso num futuro próximo. Existem duas propriedades distintas associadas à demanda por informações armazenadas na memória *cache*, isto é, associadas às referências a (endereços de) memória.

- **Espacial**: as referências à memória são feitas, geralmente, em endereços muito próximos entre si;

- **Temporal:** um mesmo endereço, já acessado anteriormente, tende a ser referenciado novamente.

Uma discussão sobre *Localização Espacial* pode ser encontrada em [Castanheda, 1999], que afirma que “quando um nó se move, ele não o faz nem *para muito longe* e nem *tão rápido!*” As técnicas de localização espacial exploram este fato, fazendo requisições de rota apenas numa região limitada que já fazia parte de uma rota válida, não propagando mensagens de controle para toda a rede.

As técnicas de localização temporal significam que:

- se um nó **i** recebe um **RERR (Route Error)**, o erro está indicando a ocorrência de descarte, em um nó mais adiante no caminho para **j**, de um pacote de dados recém enviado pelo nó **h**. Neste caso:
 - Há uma grande probabilidade deste pacote ainda estar na *cache* de **i**.
 - Se **i** conhece outra rota para **j**, ele pode “salvar” o pacote.

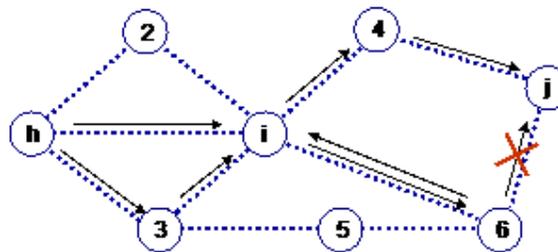


Figura 18: CHAMP – Se o enlace (6,j) cair, esta informação é passada aos demais nós da rede através de mensagens RERR. O nó *i* (antecessor de 6) pode conhecer uma rota alternativa para o nó *j*.

3.5.3.2 Objetivos do protocolo CHAMP

São os seguintes os objetivos do protocolo CHAMP:

- Reduzir a perda de pacotes de dados;
- Possibilitar a recuperação de pacotes de forma distribuída;
- Reduzir a propagação de tráfego de controle para descoberta e recuperação de rotas.

Para atingir esses objetivos há um maior consumo de memória para:

- *Caching* de dados;

- Armazenamento de rotas múltiplas, já que todo nó deve manter, pelo menos, duas rotas para todos os destinos ativos.

3.5.3.3 Estratégia de Otimização de Tráfego

Para otimizar o tráfego de informações de controle, são utilizados os próprios pacotes de dados, em vez de pacotes de controle especiais do tipo **permanecer-vivo** (*keep-alive*), para anunciar que o nó ou enlace continua ativo;

Para isto, é utilizado um algoritmo de balanceamento em que os pacotes de dados seriam enviados por todos os caminhos conhecidos, confirmando assim a disponibilidade de todas as rotas guardadas;

Desta forma, entretanto, surge uma questão nova a ser tratada: muitos pacotes de dados podem chegar ao destino duplicados e/ou fora de ordem, provocando degradação de aplicações. Para evitar este problema são utilizados apenas caminhos de **igual comprimento** (número de saltos).

3.5.3.4 Estrutura de Dados Utilizada pelo Protocolo CHAMP

- *Cache* de rotas
 - Para encaminhamento de pacotes de dados
- *Cache* de requisição de rotas
 - Requisições de rota recebidas e processadas recentemente
- *Buffer* de envio:
 - Guarda os pacotes aguardando transmissão
- *Cache* de dados:
 - Guarda os pacotes de dados recém-enviados

As entradas na **cache de rotas** devem prover as seguintes informações:

- Identificador do destino **j**;
- Distância para o destino **j** (S_{ij});
- Conjunto dos nós sucessores;

- Tempo em que cada nó sucessor foi usado para encaminhamento de pacotes;
- Número de vezes que cada sucessor foi usado.

Observe que as entradas são apagadas após esgotado seu tempo de vida pré-definido (*TTL*).

As entradas na *cache de requisição de rotas* devem prover as seguintes informações:

- Lista dos **RREQ** recebidos processados;
- Identificação do nó origem do **RREQ** (**h**);
- Identificação do nó de destino (**j**);
- Número de seqüência do **RREQ** (*sequence number*);
- Distância mínima até **j**;
- Conjunto de nós que retransmitiram o **RREQ**;
- Estado do **RREQ**: replicado, não-replicado.

3.5.3.5 Descrição do Protocolo

- É criado um conjunto S_i^j dos **nós sucessores** de **i** para cada destino **j**.
 - Opera por demanda, o nó **i** guarda S_i^j apenas se houver dados para **j**.
- Um nó **k** que possua um enlace bidirecional conectado a **i** só é incluído no conjunto S_i^j se a rota de **k** para **j** for uma de menor caminho.
- A descoberta de rotas por difusão gera um **DAG** (*Directed Acyclic Graph*) e computa sua distância a **j**:
 - **h** inicia RREQ quando tem dados para transmitir para **j**.
 - Todo nó guarda o conjunto de nós P_h^j que podem receber RREP de **i**.
- Só considera os caminhos de menor distância de **h** para **j**.

Para garantir a manutenção de todas as rotas armazenadas, os dados são enviados por *round-robin*, fazendo com que todas as rotas sejam periodicamente utilizadas.

- Se **i** perder todas as rotas, então inicia o processo de manutenção de rotas, novamente;

- Um enlace (**i,k**) falha se **i** não consegue falar com **k** e, neste caso, **k** é apagado de S_i^j .
 - Conjunto dos próximos nós nos caminhos para **j**.

O procedimento de recuperação (salvamento) dos pacotes de dados, pelos nós intermediários do caminho de **h** para **j** é feito da seguinte maneira:

- Considere que (**i,k**) tenha falhado, quando o nó **i** tentava encaminhar-lhe um pacote de dados a ser entregue ao nó **h**.
- Se **i** tem outro caminho para **j** e o pacote de dados ainda está em seu *cache*, ele usa essa rota para enviar o pacote.
- Caso contrário, ele remove o pacote de dados de seu *cache* e adiciona o cabeçalho do pacote de dados no **RERR**.
 - Se **i** falha ao tentar salvar os dados, ele envia o **RERR** por difusão.

3.5.3.6 Análise do Protocolo

O protocolo **CHAMP** introduziu uma interessante otimização ao utilizar os próprios pacotes de dados em vez de pacotes de controle especiais do tipo **permanecer-vivo** (*keep-alive*), para anunciar que o nó ou enlace continua ativo, ao fazer com que os pacotes de dados sejam enviados por todos os caminhos conhecidos, de forma balanceada;

Certamente que muitos pacotes devem chegar ao destino duplicados (devido à ocorrência de *timeout*) e fora de ordem (devido ao balanceamento de carga entre os caminhos conhecidos), provocando degradação de aplicações. Com o uso de caminhos disjuntos de **igual comprimento** é possível, realmente, minimizar esses problemas, desde que sejam também **enlaces de mesma velocidade**.

A utilização de **caching de pacotes cooperativa** com o objetivo de reduzir a perda de pacotes de dados devido à freqüente queda de enlaces representa, também, uma otimização muito importante.

O autor conclui que devido à propriedade de localização temporal na perda de pacotes, um *cache* pequeno, para cinco pacotes, é suficiente para melhorar a taxa de entrega de pacotes. Esta técnica permite o salvamento de pacotes de forma distribuída.

O artigo afirma, ainda, que a escolha de apenas duas rotas entre cada par de nós já representa a solução ótima, não sendo necessária a descoberta de mais de dois caminhos alternativos, o que não acrescentaria maiores benefícios.

Na comparação entre o desempenho dos três protocolos, os autores afirmam que:

- Os algoritmos **AODV** e **DSR**, especialmente em cenários mais dinâmicos e de maior carga de tráfego, tiveram uma melhora de desempenho significativa com o uso de *cache* para até cinco pacotes de dados e duas rotas alternativas.
- Em termos de entrega de pacotes, o protocolo **CHAMP** foi superior aos outros dois em 30%.
- Em cenários de maior congestionamento, o atraso do **CHAMP** foi a metade dos atrasos do **AODV** e **DSR**.
- A sobrecarga na rede gerada pelo tráfego de roteamento mostrou-se relativamente menor para o protocolo **CHAMP**, em taxas de mobilidade mais alta.

O protocolo **CHAMP** mostrou-se mais efetivo, a despeito de gerar um percentual de entrega de pacotes fora-de-ordem (*out-of-order*) mais alta, devido ao balanceamento de carga por-pacote (*per-packet basis*).

As idéias propostas neste artigo trazem, realmente, inovações que devem ser melhor estudadas e que podem ser aplicadas em outros protocolos já conhecidos, como é o caso das otimizações aqui propostas para o AODV e o DSR.

4 CONCLUSÕES

4.1 Introdução

Alguns protocolos de roteamento para redes móveis sem fio *ad hoc* já foram padronizados pelo Grupo de Trabalho MANET do IETF (*Internet Engineering Task Force*): AODV (RFC 3561), OLSR (RFC 3626), TBRPF (RFC 3684) e DSR (Draft dsr-09) e segundo algumas referências em foruns, outros estariam sendo considerados como candidatos à padronização: DSDV e TORA, embora não haja referência a respeito no próprio IETF¹⁶.

Implementações de alguns desses protocolos podem ser obtidas da Internet em *thefreedictionary*¹⁷ e *wikipedia*¹⁸, para ambientes *Unix* e *Windows*.

Na França, o projeto HIPERCOM (*High Performance Communication*), do INRIA (*Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique*), vem desenvolvendo pesquisas em projeto, avaliação e otimização de algoritmos usados no contexto de telecomunicações e transferência de informação. Em especial, estão pesquisando o protocolo de **Roteamento de Estado de Enlace Otimizado** (*OLSR – Optimized Link State Routing*) (<http://hipercom.inria.fr/olsr/>), onde se pode obter uma síntese de todas as informações publicadas a respeito deste algoritmo, incluindo a lista de *drafts*; RFC 3626; implementação em linguagem C da versão 3 (draft-ietf-manet-olsr-03.txt) para Linux, Windows 2000 e Pocket PC. Uma implementação ainda experimental do OLSRv11 (draft-ietf-manet-olsr-11.txt), em Python, também está disponível.

O LRI¹⁹ (*Laboratoire de Recherche en Informatique*), da *Université Paris Sud*²⁰, está atualmente trabalhando em QOLSR, que é um esforço em se estudar e implementar suporte QoS estado-da-arte em uma implementação de trabalho do núcleo do protocolo OLSR. Esta implementação inicial, qolyester, já está disponível em <http://qolsr.lri.fr>.

¹⁶ www.ietf.org

¹⁷ <http://encyclopedia.thefreedictionary.com/Ad%20hoc%20protocols%20implementations>

¹⁸ http://en.wikipedia.org/wiki/Ad_hoc_protocol_implementations

¹⁹ <http://www.lri.fr>

²⁰ <http://www.u-psud.fr/>

Ao longo das discussões sobre roteamento, apresentadas no Capítulo 3, procurou-se mostrar aspectos gerais sobre os principais protocolos de roteamento de redes móveis *ad hoc*, sem a preocupação de discutir detalhes de implementação e nem de ser exaustivo na escolha do conjunto dos protocolos a serem abordados. Existem inúmeros outros protocolos importantes não abordados neste trabalho e, por outro lado, a discussão dos detalhes de implementação de um protocolo de roteamento exigiria um estudo muito mais aprofundado, demandando um tempo muito maior de elaboração, o que fugiria à proposta deste trabalho.

No próximo item é apresentada uma análise dos principais protocolos discutidos, considerando as implicações da estratégia de roteamento utilizada em relação às características de tráfego e mobilidade das redes móveis *ad hoc*. Na elaboração desta análise foram utilizadas as seguintes referências bibliográficas: [Lee, 2003; Hong, 2002a; Obradovic, 2002; Castanheda, 1999].

No item final deste capítulo é apresentada a Tabela Sumário dos Protocolos de Roteamento para Redes *Ad hoc*. Um aprofundamento no estudo dos algoritmos de roteamento para redes móveis sem fio *ad hoc*, especialmente no caso dos protocolos CHAMP, DREAM e dos protocolos híbridos, permitiria um maior detalhamento do conjunto de propriedades sintetizadas em referida tabela, tornando-a mais efetiva para futuros estudos na área.

4.2 Análise dos Protocolos de Roteamento

Foi visto, no Capítulo 3, que a estrutura da rede, sua densidade, demanda de tráfego e taxa de mobilidade têm grande influência no desempenho dos protocolos de roteamento. Foi visto também que esses protocolos podem ser classificados em quatro tipos, de acordo com a estratégia de roteamento utilizada para a requisição e manutenção das rotas: pró-ativos, reativos, hierárquicos e assistidos por posicionamento (localização). Na realidade, no estudo dos protocolos apresentados, observa-se que alguns deles não se enquadram exatamente em nenhum dos tipos propostos, já que integram mais de uma dessas estratégias de roteamento. Um exemplo é o protocolo **LANMAR**, que é do tipo hierárquico mas utiliza o protocolo **FSR** na comunicação interna entre os nós de um mesmo grupo ou zona.

Foi visto também que os protocolos pró-ativos e reativos se baseiam, de alguma forma, nos algoritmos de cálculo de Vetor de Distâncias (DV) e de Estado de Enlaces (LS), utilizados nas redes tradicionais.

Os protocolos do tipo DV apresentam bom desempenho em redes estáticas, já que todos os seus nós mantêm uma visão da topologia de toda a rede. São indicados para aplicações de tempo real ou que demandam tráfego pesado, mas não para redes dinâmicas, pois apresentam convergência lenta e tráfego de controle excessivo. Seu uso em redes móveis *ad hoc* exige alguns aprimoramentos que possam atenuar esses problemas. O protocolo WRP, por exemplo, consegue atenuar o problema de tráfego de controle excessivo ao enviar apenas as rotas alteradas e não tabelas de rotas completas, especialmente nos cenários em que os nós da rede formam e se movem em grupos. Mas ele não resolve a questão da convergência lenta que é crítica nos cenários de maior mobilidade.

Os protocolos do tipo LS são mais adequados para redes que exigem garantia de QoS, porque permitem que se associe os custos às capacidades dos enlaces, mas seu tráfego de controle é ainda maior, uma vez que todos os nós da rede precisam conhecer a topologia completa e atualizada da rede. A sobrecarga de informações de controle, no caso de redes dinâmicas, é ainda mais crítica que nos algoritmos do tipo DV.

Em cenários de maior mobilidade em que as rotas já aprendidas perdem sua precisão é necessário utilizar algum mecanismo complementar para evitar altas taxas de perda de pacotes de dados e/ou latências excessivas para a descoberta de novas rotas. No caso dos protocolos do tipo DV em redes móveis *ad hoc*, foi introduzido um aperfeiçoamento que considera os seguintes princípios:

- a) Efeito da *Distância* [Hong, 2002a]: Quanto maior a distância entre dois nós, menor é a percepção do movimento de um nó relativamente ao outro.
- b) Efeito da *Localização Espacial* [Castanheda 1999]: quando um nó se move, ele não o faz nem *para muito longe* e nem *tão rápido*.

Estes dois princípios estabelecem que, quanto mais próximo do destino estiver um nó intermediário, **mais exata** e **correta** deve ser a rota que ele conhece, para garantir a convergência progressiva do encaminhamento, à medida que o pacote de dados se aproxima do destino, em movimento. Em outras palavras, a frequência de atualização das rotas deve ser mais rápida para os nós mais próximos do destino. Os protocolos pró-ativos, FSR e FSLs levam em conta esses princípios ao implementar um ajuste seletivo da frequência de atualização de rotas – atualizando com maior frequência os nós mais próximos –, alcançando desta forma uma redução do tráfego de controle.

Outro protocolo pró-ativo, o OLSR, introduz uma otimização adicional no algoritmo LS, minimizando o número de nós que retransmitem os pacotes de controle, ao determinar o conjunto mínimo de nós vizinhos imediatos (conjunto MPR) requeridos para alcançar **todos** os vizinhos de dois saltos. Também o protocolo TBRPF limita o tráfego de controle pelo uso de informações de atualização diferenciais: cada nó só retransmite uma atualização de rota se esta for recebida através de seu **nó pai**, relativamente ao caminho pelo qual a rota original foi aprendida.

Tanto o OLSR como o TBRPF trabalham mais eficientemente em redes densas, enquanto o FSR e o FSLS são mais apropriados para redes mais extensas (com diâmetros maiores).

Pelo exposto, observa-se que tanto o OLSR como o TBRPF operam mais eficientemente em redes densas, enquanto o FSR e o FSLS são mais apropriados para redes mais extensas (com diâmetros maiores).

Os protocolos de roteamento Por-Demanda procuram rotas disponíveis para o destino somente quando necessário:

Os protocolos **por demanda**, como é o caso do AODV, geram menor tráfego de controle que os protocolos **pró-ativos** porque não há requisição de rotas para **todos** os nós da rede, *a priori*, e não é gerado nenhum tráfego de atualização de informações de controle. Neste caso, a rota para um determinado nó de destino só é requisitada quando houver algum pacote de dados para aquele nó e as rotas assim aprendidas permanecem válidas apenas por algum tempo (enquanto estiverem sendo utilizadas). Esse tipo de protocolo tende a apresentar um melhor desempenho que os protocolos **pró-ativos**, mesmo em cenários de alta mobilidade, embora pagando o preço de ter uma latência inicial adicional para a aquisição de rota. Outra desvantagem desse tipo de algoritmo é que uma quebra de rota por falha de enlace só é detectada quando do envio de um pacote de dados através daquela rota e, neste caso, é demandada uma latência ainda maior para a aquisição de nova rota. Este é o caso do protocolo **DSR** que utiliza rota na origem e os nós intermediários não precisam aprender rotas para o destino. Ao identificar uma quebra de rota, descartam o pacote de dados e enviam um pacote de controle **RERR** para a origem que deve, então, proceder à aquisição de nova rota e à retransmissão do pacote de dados [Hong, 2002a].

O algoritmo AODV, especialmente com a otimização proposta por Obradovic [2000 e 2002] consideram esses aperfeiçoamentos para a redução do tráfego de controle e para melhorar a capacidade de recuperação de rota pelos nós intermediários, a despeito de operar com definição de rota na origem [RFC3561, 2003]. Uma proposta complementar, aplicada ao algoritmo AODV, foi apresentada recentemente no XXI^o Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores, propondo um mecanismo de inundação controlada (*CF – Controlled Flooding*) para reduzir a frequência de inundação da rede descoberta de novas rotas. Este artigo não chegou a ser analisado neste trabalho, mas se encontra disponível em [Costa, 2003].

Tanto o AODV como o DSR são bem escaláveis para redes grandes, quando o padrão de comunicação é esparso e a mobilidade é pequena.

Outro protocolo **por demanda** recente é o AOMDV (*Ad hoc On-demand Multipath Distance Vector*), que é uma extensão do AODV que explora a redundância de conectividade das redes *ad hoc*, operando com múltiplos caminhos disjuntos de roteamento, obtendo, assim, uma redução na taxa de perda de pacotes, no atraso médio de entrega de pacotes fim-a-fim e na sobrecarga de tráfego de controle para atualização de rotas. Mais detalhes sobre este protocolo estão disponíveis em <http://www.cs.sunysb.edu/~mahesh/aomdv/>.

Os protocolos **hierárquicos** são, em geral, híbridos (combinam algoritmos de tipos diferentes em sua implementação) e introduzem uma técnica que consiste em organizar os nós da rede em grupos que tenham características comuns. Esta técnica é semelhante àquela utilizada pelo protocolo OSPF (*Open Shortest Path First*) tradicional, em que o tráfego de controle contendo informações referentes aos nós de um mesmo *Sistema Autônomo* (equivalente ao conceito de **grupo** dos protocolos **hierárquicos**) não se propaga para fora do grupo. Os protocolos **hierárquicos** definem num mesmo grupo (ou zona) os nós que:

- a) Estejam numa mesma região ou zona (protocolo ZRP);
- b) Comunicam-se diretamente entre si e se deslocam numa mesma velocidade e direção.

Normalmente, este tipo de protocolo utiliza um algoritmo de roteamento do tipo **pró-ativo** (FSR, por exemplo) na comunicação intra-zona e um algoritmo **reativo (por demanda)** na comunicação inter-zonas, limitando assim o tráfego de requisição de rotas. Sua eficiência depende da escolha adequada dos grupos.

Os protocolos com **localização** (ou **assistidos por posicionamento**), por sua vez, exigem que todos os seus nós disponham de recursos de GPS para permitir o encaminhamento direcional de dados, reduzindo, desta forma, a propagação de informações de controle na rede. Esses recursos de localização acrescentam uma propriedade adicional aos nós da rede que permite a implementação de protocolos híbridos em que as decisões de roteamento se referem às coordenadas de posicionamento dos nós e não apenas às identificações dos nós. Para que o posicionamento e a movimentação dos nós sejam conhecidos por toda a rede é necessário que todos os nós enviem, periodicamente, informações de controle de atualização. Uma solução híbrida que considere a organização dos nós em grupos, como nos protocolos **hierárquicos**, permite limitar a propagação das informações de controle, melhorando a eficiência do protocolo.

Do exposto, podemos concluir que não existe um algoritmo único que seja superior aos demais em todos os cenários possíveis. Para a escolha da melhor solução que atenda a uma necessidade real, é fundamental conhecer os aspectos críticos deste cenário de interesse, em termos de:

- Área de alcance da rede;
- Densidade de nós;
- Taxa de mobilidade dos nós da rede;
- Características da movimentação dos nós: constante, aleatória, variável, com pausas, individual ou em grupos etc.;
- Volume de tráfego de dados.

Observa-se, entretanto, que alguns recursos novos introduzidos nos algoritmos propostos mais recentemente, como o uso de *cache* de dados combinado com a descoberta e utilização de múltiplos caminhos (como é o caso dos protocolos CHAMP e AOMDV), apoiados por técnicas que permitam limitar a propagação de mensagens de controle para a descoberta e/ou manutenção de rotas por difusão (utilização de agrupamentos de nós e/ou recursos de localização), parecem proporcionar um aumento de desempenho significativo em algoritmos de roteamento para redes móveis *ad hoc*. Esta parece ser a tendência dos estudos futuros na área.

O conjunto de artigos abordados mostra que o uso de simulação é um recurso muito utilizado na análise de desempenho de protocolos de roteamento em redes móveis *ad hoc*, implementados com base na especificação de cenários que retratam situações reais. Há quase uma unanimidade no uso do simulador **ns-2** (*network simulator versão 2*)²¹, provavelmente por ser um *software* livre e aberto, e que possui muita documentação na Internet, inclusive, para modelagem de redes sem fio.

Ao se considerar os resultados das simulações apresentadas nesses artigos, é fundamental fazer um estudo bastante acurado da modelagem utilizada na simulação e da própria implementação no simulador, antes de se aceitar as conclusões apresentadas. Muitas vezes, a modelagem utilizada na simulação não é claramente descrita no artigo, dificultando a repetição do experimento.

Uma nova tendência que se observa em alguns artigos e Teses de Doutorado mais recentes é o uso de métodos analíticos para a demonstração formal da correção de protocolos de roteamento e a apresentação da análise de sua complexidade.

Na próxima seção é apresentada uma Tabela Comparativa de Algoritmos de Roteamento para Redes *Ad hoc* que compara as características dos principais algoritmos de roteamento para este tipo de redes. Esta tabela foi construída a partir do estudo dos protocolos nela relacionados, complementado por alguns estudos comparativos apresentados em [Cordeiro, 2002; Hong, 2002a, Kashyap, 2001]. É importante fazer algumas observações para facilitar o entendimento das informações apresentadas na Tabela:

- Uma célula em branco significa que o protocolo retratado naquela coluna não possui a propriedade apresentada naquela linha;
- O termo “**N/I**”, contido em algumas células indica que não foi verificado na literatura pesquisada se a propriedade apresentada naquela linha é ou não atendida por referido protocolo;
- Os protocolos hierárquicos (LANMAR e ZRP) não foram incluídos na tabela por serem protocolos híbridos, já que suas propriedades principais são inerentes aos

²¹ <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>

algoritmos de roteamento básicos que os compõem, tornando-se inadequado representá-los nesta tabela;

- Alguns protocolos apresentam uma nota de rodapé para melhor explicar a forma com que referida propriedade é atendida pelo protocolo.

4.3 Sumário dos Protocolos

CARACTERÍSTICA	AODV	CHAMP	DREAM	DSDV	DSR	FSR	LAR	OLIVE	OLSR	TBRPF	WRP
1) Classe de protocolo:											
Reativo (Por demanda)	X	X			X		X	X			
Pró-ativo			X	X		X			X	X	X
2) Estratégia de roteamento:											
Estado de enlace (LS)		X	X			X		X	X	X	
Vetor de distância (DV)	X			X	X						X
Localização (GPS)		X	X				X				
3) Estrutura de armazenamento usada:											
Topologia completa da rede em todos os nós						X		X			
Topologia parcial da rede em todos os nós	X	X		X	X		X		X	X	X
Coordenadas de todos os nós		X	X								
Utiliza cache de rotas		X			X						
Utiliza cache de dados		X									
Guarda múltiplos caminhos	X	X			X						
4) Processo de descoberta de rotas:											
Tipo de inundação da rede:											
Inundação em toda a rede				X	X			X			X
Inundação controlada	X	X				X	X (1)		X	X	
Inundação controlada direcional			X								
5) Processamento de atualização de rotas:											
Associa custo aos caminhos (veloc., congest.)	N/I					X			N/I	N/I	N/I
Gera atraso p/ descoberta de rota	X	X			X		X	X			
Métrica para seleção de rotas:											
Número de seqüência	X			X							
Menor caminho	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Localização			X				X				
Existência de laços (loops):											
Reduz as situações de laço						X					X
Elimina ocorrências de laços	X	X	X	X	X		X	X	X	X	
Convergência das rotas:											
Lenta											
Acelera a convergência	X	X		X	X	X		X			X
Rápida			X				X		X	X	

CARACTERÍSTICA	AODV	CHAMP	DREAM	DSDV	DSR	FSR	LAR	OLIVE	OLSR	TBRPF	WRP
6) Envio de atualizações de rotas:											
Transmissão para os vizinhos	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X
Transmissão para a origem											
Faz retransmissões multiponto (MPR)									X		
Gatilho para atualização de rota											
Por tempo				X		X			X	X	X
Por evento	X	X	X		X		X	X			X
Conteúdo dos pacotes de controle (enviados pelo nó A):											
Toda a tabela/topologia						X (2)					
Envia apenas as alterações	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X
Apenas vizinhos que contém A como MPR									X		
Informações de Localização		X	X				X				
Utiliza TTL que depende da distância			X								
Se não houver alteração, envia apenas HELLO	N/I		X	N/I				N/I		X	X
Envio de mensagens periódicas:											
Por tempo			X	X		X	X		X	X	X
Por evento	X	X(3)			X			X	X		X
Por timeout				N/I		N/I	N/I		N/I		X
Periodicidade de envio:											
Fixa				X			X		X	X	
Variável por tipo de entrada ou TTL			X			X					X
Depende da distância entre os nós						X					
Envio de ACK de pacote de controle obrigatório		X(3)	X	N/I	N/I	N/I	N/I	N/I	N/I	N/I	X
Área de inundação:											
Toda a rede			X	X	X			X			X
Somente vizinhos MPR (de um salto)									X		
Somente vizinhos de 1 salto	X					X		X		X	
Somente vizinhos de n saltos											
Delimitada por localização		X	X				X				
7) Envio de pacotes de dados:											
Inclui rota na origem do pacote					X						
Inclui conjunto de sucessores (1 salto)		X	X								
Salto a salto (hop by hop)	X		X	X		X	X	X	X	X	X

- (1) Apenas os nós localizados na direção do destino
(2) Inclui apenas os conjuntos de vizinhos na direção do destino.
(3) Utiliza o próprio pacote de dados para enviar as informações de controle.

5. REFERÊNCIAS

- ADAMSON, B. **Tactical Radio Frequency Communication Requirements for IPng**, RFC 1677, Agosto 1994.
- AGARWAL, A. e DUTTA, C. **Capacity of Ad Hoc Wireless Networks**. Indian Institute of Technology Kanpur. 2002.
- ANO, J. C. e MANZONI, P. **Performance Analysis of Power-aware Route Selection Protocols in Mobile Ad hoc Networks**. University of California at Santa Cruz. WorldScientific. Junho, 2002.
- BAO, L. e Garcia-Luna-Aceves, J.J. **Topology Management in Ad Hoc Networks**. Proc. The Fourth ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (ACM MobiHoc 2003), Annapolis, Maryland, June 1-3, 2003.
- _____. **Distributed Dynamic Channel Access Scheduling for Ad Hoc Networks**. JPDC, Special Issue on Wireless and Mobile Ad Hoc Networking and Computing, 2002.
- _____. **Transmission Scheduling in Ad Hoc Networks with Directional Antennas**. Proc. ACM/IEEE MobiCom 2002, Atlanta, Georgia, USA, September 23-28, 2002.
- _____. **Distributed Transmission Scheduling Using Code-Division Channelization**. Proc. IFIP-TC6 Networking 2002, Pisa, Italy, 19-24 May 2002.
- BAO, L. **Neighbor-aware Control in Ad hoc Networks**. Ph. D. Dissertation. University of California. Santa Cruz. 2002.
- _____. **Neighbor-Aware Control in Ad Hoc Networks**. PhD Thesis, Computer Science, University of California, Santa Cruz, CA 95064, December, 2002.
- BASAGNI, I. C., SYROTIUK, V. R., WOODWARD, B. **A Distance Routing Effect Algorithm for Mobility (DREAM)**. Proc. ACM/IEEE Mobicom, pages 76-84, October 1998.

- BHARGAVAN, K., OBRADOVIC, D. & GUNTER, C. **Formal Verification of Standards for Distance Vector Routing Protocols**. University of Pennsylvania. Novembro 2000.
- BOLENG, J e CAMP, T. **Adaptive Location Aided Mobile Ad Hoc Network Routing**. Colorado School of Mines. Junho, 2003.
- BOUKERCHE, A. **Performance Comparison and Analysis of Ad Hoc Routing Algorithms**. Proceedings of the IEEE Performance, Computing and Communications, 2001.
- CAMP, T.; BOLENG, J. e DAVIES, V. **A Survey of Mobility Models for Ad Hoc Network Research**. WCMC: Special issue on Mobile Ad Hoc Networking: Research, Trends and Applications, vol. 2, n. 5, pp. 483-502, 2002.
- CORDEIRO, C. M. e AGRAWAL, D. P. **Mobile Ad hoc Networking**. XX^o Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores. p. 125 a 186. Julho 2002.
- CORSON, S. e MACKER, J. **Mobile Ad hoc Networking (MANET): Routing Protocol Performance Issues and Evaluation Considerations**. RFC 2501, Janeiro 1999.
- CORSON, S. e MACKER, J., **Mobile Ad hoc Networking (MANET): Routing Protocol Performance Issues and Evaluation Considerations**, RFC 2501, Janeiro 1999.
- COSTA, L. H. M. K.; AMORIM, M. D. E FDIDA, S. **Reduzindo a Frequência de Inundações em Protocolos de Roteamento Ad Hoc Sob Demanda**. XXI^o Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores. p. 21 a 35.
- DU, Yu; BAO, Ye e GARCIA-LUNA-ACEVES, J.J. **A History-based Scheduling Protocol for Ad Hoc Networks**. ICCCN 2003, Outubro.
- EWERTON L. Madrugá. **Multicasting in Ad Hoc Networks**. PhD Thesis, Computer Engineering, University of California, Santa Cruz, CA 95064, September, 2002.
- FREITAS Fo, P. J. **Introdução à Modelagem e Simulação de Sistemas**. Ed. Visual Books. Santa Catarina: 2001.

- GARCIA-LUNA-ACEVES, J.J.; MOSCO, M. e PERKINS C. **A New Approach to On-Demand Loop-Free Routing in Ad Hoc Networks**. Proc. Twenty-Second ACM Symposium on Principles of Distributed Computing (PODC 2003), Boston, Massachusetts, July 13--16, 2003.
- GELLENS, R., **Wireless Device Configuration (OTASP/OTAPA) via ACAP**. RFC2636. Julho 1999.
- GERLA, M.; XU, K. e MOSHFEGH, A. **Minuteman: Forward Projection of Unmanned Agents Using the Airborne Internet**. IEEE Aerospace Conference 2002, Big Sky, MT, Mar. 2002.
- HAAS, Z.; DENG, J; LIANG, B; *at al.* **Wireless Ad-Hoc Networks**. School of Electrical and Computer Engineering. Cornell University, Ithaca, NY 14853, 2002.
- HONG, X.; MA, L. e GERLA, M. **Multiple Landmark Routing for Large Groups in Ad Hoc Networks**. Proceedings of MILCOM 2002 Military Communications Conferences, Anaheim, CA, Oct.7-10,2002.
- HONG, X.; NGUYEN, N.; LIU, S. e TENG, Y. **Dynamic Group Support in LANMAR Routing Ad Hoc Networks**. Proceedings of the Fourth IEEE Conference on Mobile and Wireless Communications Networks (MWCN 2002), Stockholm, Sweden, Sept. 2002.
- HONG, X.; XU, K. e GERLA, M. **Scalable Routing Protocols for Mobile Ad Hoc Networks**. IEEE Network Magazine, July-Aug, 2002, pp. 11-21.
- HSIN, C. **Ad Hoc Networks And Challenges**. <http://citeseer.ist.psu.edu/557711.html>. Arquivo consultado em fevereiro de 2004.
- JIANG, X. e CAMP, T. **An Efficient Location Server for an Ad Hoc Network**. Colorado School of Mines. Technical Report MCS-03-06. Maio, 2003.
- KASHYAP, A.; NISHAR H.; AGARWAL, P. **Survey on Unicast Routing in Mobile Ad Hoc Networks**. University of Texas at Dallas. Novembro 2001.
- LAUSCHNER, T. **Verificação Formal e Análise de Protocolos de Roteamento de Redes Móveis Ad-hoc**. Proposta de dissertação de Mestrado. <http://jurua.dcc.fua.br/~tanara/proposta.html>, acessado em 06/2003. Julho 2001.

- LEE, SUNG-JU; HSU, J.; HAYASHIDA, R. GERLA, M. et al. **Selecting a Routing Strategy for your Ad Hoc Network**. University of California, Los Angeles. Computer Communications, Vol. 26, Issue 7, pp 723-733, May 2003, Elsevier Science.
- LI, J. BLAKE, C. et. all. **Capacity of Ad Hoc Wireless Networks**. M.I.T. Laboratory for Computer Science. MIT. International Conference on Mobile Computing and Networking. ACM Press 2001.
- LIANG, B.; HAAS, Z. J. **Optimizing Route-Cache Lifetime in Ad Hoc Networks**. University of Toronto. INFOCOM 2003.
- LIM, H.; KU, K.; GERLA, M. **TCP Performance over Multipath Routing in Mobile Ad Hoc Networks**. - ICC 2003.
- MITZEL, D., **Overview of 2000 IAB Wireless Internetworking Workshop**, RFC3002. Workshop realizado pela IAB (Internet Architecture Board) de 29/02 a 2/03/2000. Mountain View. Fevereiro 2000.
- MOURA, A. M. C. e Peixoto, M. V. **Protocolo de Roteamento para Redes de Comunicação Móvel sem Fio Ad Hoc com QoS**. Relatório Técnico no 064/DE9/00; Instituto Militar de Engenharia. 2000.
- OBRADOVIC, D. **Formal Analysis of Routing Protocol**. Ph.D Thesis. University of Pennsylvania, pp 41-50, 2002.
- _____. **Formal Analysis of Convergence of Routing Protocol**, Ph.D. Thesis Proposal. University of Pennsylvania. Novembro 2000.
- PHAM, P. P. e PERREAU, S. **Performance Analysis of Reactive Shortest Path and Multi-path Routing Mechanism With Load Balance**. University of South Australia. INFOCOM2003.
- RFCs – Request For Comments:**
- ROY, S. & GARCIA-LUNA-ACEVES, J.J. **Node-Centric Hybrid Routing for Ad Hoc Networks**. Proc. 10th IEEE/ACM International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunications Systems-Workshops (MASCOTS 2002 Workshops), Fort Warth, Texas, October 12, 2002.

- ROY, S. & GARCIA-LUNA-ACEVES, J.J. **Node-Centric Hybrid Routing for Ad Hoc Wireless Extensions of The Internet**. Proc. IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM), Taipei, Taiwan, November 17-21, 2002.
- ROY, S. e Garcia-Luna-Aceves, J.J. **An Efficient Path Selection Algorithm for On-Demand Link-State Hop-by-Hop Routing**. Proc. IEEE International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN), Miami, Florida, October 14-16, 2002.
- TANENBAUM, A. S. **Redes de Computadores**. Tradução da Quarta Edição. Ed. Campus. Rio de Janeiro: 2003.
- VALERA, A.; SEAH, W. K. G e RAO, S. V. **Cooperative Packet Caching and Shortest Multipath Routing in Mobile Ad hoc Networks**. National University of Singapore. INFOCOM 2003.
- WANG, Y.; GARCIA-LUNA-ACEVES J. J. **A New Hybrid Channel Access Scheme for Ad Hoc Networks**. ACM WINET Journal, Special Issue on Ad-Hoc Networks, Vol. 10, No. 4, July 2003.
- _____. **Throughput and Fairness in a Hybrid Channel Access Scheme for Ad Hoc Networks**. Proc. IEEE WCNC 2003, New Orleans, Louisiana, 16-20 March 2003.
- WILLIAMS, B.; MEHTA, D. e CAMP, T. **Predictive Modeling of Network Wide Broadcasting Protocols for Mobile Ad Hoc Networks**. Colorado School of Mines. Technical Report MCS-03-05. Abril, 2003.
- XU, K.; BAE, S.; LEE, S. e GERLA, M. **TCP Behavior across Multihop Wireless Networks and the Wired Internet**. WoWMoM'02. Atlanta, Georgia. Setembro, 2002.
- XU, K.; GERLA, M. **A Heterogeneous Routing Protocol Based on a New Stable Clustering Scheme**. IEEE MILCOM 2002, Anaheim, CA, Oct. 2002.
- XU, K.; GERLA, M. e BAE, S. **How Effective is the IEEE 802.11 RTS/CTS Handshake in Ad Hoc Networks?** IEEE Globecom 2002.

XU, K.; HONG, X. e GERLA, M. **Landmark Routing in Ad Hoc Networks with Mobile Backbones**. Journal of Parallel and Distributed Computing (JPDC), Special Issues on Ad Hoc Networks, 2002.

_____. **An Ad Hoc Network with Mobile Backbones**. IEEE ICC 2002, New York, NY, Apr. 2002.

XU, K.; HONG, X.; GERLA, M.; LY, H. e GU, D. **Landmark Routing in Large Wireless Battlefield Networks Using UAVs**. IEEE MILCOM'01, Vienna, VA, Oct. 2001.

YE, Z.; KRISHNAMURTHY, S. V.; TRIPATHI, S. K. **A Framework for Reliable Routing in Mobile Ad Hoc Networks**. IEEE 2003 e INFOCOM 2003.

YI, Y.; GERLA, M., KWON, T. **Efficient Flooding in Ad hoc Networks: a Comparative Performance Study** - IEEE ICC 2003.

_____. **Efficient Flooding in Ad hoc Networks using On-Demand (Passive) Cluster Formation**. MOBIHOC 2002 Poster Session.

YI, Y.; GERLA, M.; PARK, J.; e MAGGIORINI, D.; **Team Oriented Multicast: a Scalable Routing Protocol for Large Mobile Networks**. University of California at Los Angeles. California, USA. 2003.

YI, Y.; HONG, X. e GERLA, M. **Scalable Team Multicast in Wireless Ad hoc Networks Exploiting Coordinated Motion**. NGC 2002.

_____. **Scalable Team Multicast in Wireless Ad hoc Networks Exploiting Coordinated Motion**. Computer Science Department at UCLA. ACM 2002.

YI, Y.; JIN, T. K. e GERLA, M.; **The Selective Intermediate Nodes Scheme for Ad Hoc On-Demand Routing Protocols**. ICC 2002.

YI, Y.; KWON, T. J. e GERLA, M.; **A Load aWare Routing (LWR) Based on Local Information**. University of California, Los Angeles. PIMRC 2001.

YI, Y.; XU, K.; HONG, X.; **Team communications among airborne swarms**. University of California (Minuteman project), Los Angeles. Aerospace Conference 2003.

