

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul
Faculdade de Informática
Pós-Graduação em Ciência da Computação

Protocolo de roteamento para
redes *wireless mesh*

Márcio Martins Farias

**Dissertação apresentada como requisito
parcial à obtenção do grau de Mestre em
Ciência da Computação**

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Augusto Bezerra

Porto Alegre, Março de 2008

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

F224p Farias, Márcio Martins
Protocolo de roteamento para redes wireless mesh / Márcio
Martins Farias. – Porto Alegre, 2008.
71 f.

Diss. (Mestrado) – Fac. de Informática, PUCRS.
Orientador: Prof. Dr. Eduardo Augusto Bezerra.

1. Informática. 2. Redes de Computadores.
3. Roteamento – Redes de Computadores. 4. Protocolos de
Comunicação. I. Bezerra, Eduardo Augusto. II. Título.

CDD 004.62

**Ficha Catalográfica elaborada pelo
Setor de Tratamento da Informação da BC-PUCRS**



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul
FACULDADE DE INFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

TERMO DE APRESENTAÇÃO DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Dissertação intitulada "**Protocolo de Roteamento para Redes Wireless Mesh**", apresentada por Márcio Martins Farias, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Ciência da Computação, Sistemas Embarcados e Sistemas Digitais, aprovada em 25/03/08 pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Eduardo Augusto Bezerra –
Orientador

PPGCC/PUCRS

Prof. Dr. Fabiano Passuelo Hessel –

PPGCC/PUCRS

Prof. Dr. Jorge Luís Victória Barbosa –

UNISINOS

Profa. Dra. Ana Cristina Benso da Silva –

FACIN/PUCRS

Homologada em 29/06/10, conforme Ata No. 011 pela Comissão Coordenadora.

Prof. Dr. Fernando Gehm Moraes
Coordenador.



PUCRS

Campus Central

Av. Ipiranga, 6681 – P32 – sala 507 – CEP: 90619-900
Fone: (51) 3320-3611 – Fax (51) 3320-3621
E-mail: ppgcc@inf.pucrs.br
www.pucrs.br/facin/pos

Ao meu irmão e melhor amigo Marcelo que soube dizer as palavras certas nas horas exatas, sempre motivando e ajudando a tomar as decisões corretas para que eu conseguisse a realização dos meus objetivos. À minha mãe Conceição que sempre me apoio em todas as minhas decisões, sempre se mostrando ao meu lado em todos os momentos desta caminhada; Ao meu pai Mário que sempre mostrou o quanto podemos conseguir nossos objetivos, seguindo os ensinamentos adquiridos desde criança quanto a honestidade, perseverança e humildade; Ao meu irmão Mário que sempre procurou demonstrar que através dos estudos podemos conseguir a realização profissional; Ao Sagrado Coração de Jesus pelo dom da vida e pelo apoio incondicional em todos os momentos desta caminhada.

Resumo

O trabalho apresenta características, funcionamento e arquitetura das redes *wireless mesh* assim como sua aplicabilidade em diversos cenários. São mostrados também aspectos de *hardware*, protocolos, algoritmos de roteamento, topologias e grupos de discussão criados para esta tecnologia, com destaque para os grupos de padronização IEEE 802.11s, 802.15.5 e 802.16a. Além de mostrar o funcionamento destas redes foram investigados também alguns projetos de pesquisa realizados no MIT (Massachusetts Institute of Technology), e pela Microsoft Research. São apresentados resultados de avaliação de desempenho de protocolos de roteamento de redes *mesh* em dois cenários para a mesma topologia. Os dois cenários possuem quantidades diferentes de nodos e fontes de comunicação. A avaliação foi realizada por meio de simulação com a ferramenta Network Simulator (ns2), utilizando UDP como protocolo da camada de transporte. Os resultados de simulação mostraram resultados interessantes, e também descobertas não esperadas, a partir das análises e comparações entre os protocolos de roteamento selecionados.

Palavras-chave: Protocolos de roteamento, redes *ad-hoc*, redes *mesh*, avaliação de desempenho, ns-2.

Abstract

This work discusses features, working modes and the architecture of mesh wireless networks, as well as their applicability in several scenarios. Hardware aspects, protocols, routing algorithms, topologies and IEEE discussion groups (IEEE 802.11s, 802.15.5 e 802.16a) are also introduced. Research projects have also been investigated including the on-going work at the MIT (Massachusetts Institute of Technology), and at Microsoft Research. A performance evaluation of routing protocols for ad-hoc networks, in two scenarios of the same topology, has been conducted. The two scenarios have different node counts and communication sources. The whole evaluation has been performed through simulation, using the Network Simulator (ns-2) tool, having UDP as the transportation layer protocol. The simulation results show interesting expected and unexpected findings, observed from the analysis and comparisons on the selected routing protocols.

Keywords: routing protocol; ad-hoc network; mesh networks; performance evaluation; ns-2.

Conteúdo

Capítulo 1: Introdução	15
1.1 Avaliação de Desempenho	16
1.2 Protocolos de roteamento	16
1.3 Motivação	16
1.4 Objetivos	17
1.5 Estratégia para Desenvolvimento do Trabalho	18
1.6 Organização do Texto	18
Capítulo 2: Redes <i>Wireless</i>	19
2.1 Redes <i>Wireless Ad-hoc</i>	20
2.2 Padrões IEEE para Redes <i>Wireless</i>	21
2.2.1 <i>Wireless Personal Area Network</i> - WPAN	21
2.2.2 <i>Wireless Local Area Network</i> - WLAN	22
Capítulo 3: Algoritmos de Roteamento	23
3.1 Algoritmos de roteamento não adaptativos (estático)	25
3.2 Algoritmos de roteamento adaptativos (dinâmico)	25
3.2.1 Vetor distância (<i>distance vector</i> - DV)	25
3.2.2 Estado do <i>link</i> (<i>link state</i> - LS)	25
Capítulo 4: Protocolos de Roteamento para Redes <i>Wireless</i>	27
4.1 Pró-ativos	27
4.1.1 <i>Destination-Sequenced Distance-Vector</i> (DSDV)	27
4.1.2 <i>Optimized Link State Routing Protocol</i> (OLSR)	28
4.1.3 <i>Wireless Routing Protocol</i> (WRP)	29
4.2 Reativos	30
4.2.1 <i>Dynamic Source Routing</i> (DSR)	30
4.2.2 <i>Ad-Hoc On-Demand Distance Vector</i> (AODV)	31
4.2.3 <i>Temporally Ordered Routing Algorithm</i> (TORA)	35
4.3 Híbridos	36
4.3.1 <i>Zone Routing Protocol</i> (ZRP)	36
4.3.2 <i>Fisheye State Routing</i> (FSR)	36

Capítulo 5: Redes <i>Wireless Mesh</i>	38
5.1 Características	42
5.2 Cenários e Aplicações	43
5.2.1 Banda larga de usuários domésticos	43
5.2.2 Rede da comunidade e da vizinhança	44
5.2.3 Rede Empresarial	44
5.2.4 Redes de Área Metropolitana	46
5.2.5 Sistemas de Transporte	46
5.2.6 Automatização de Edifício	47
5.2.7 Saúde e Sistemas médicos	47
5.3 Fatores críticos que influenciam o desempenho da rede	48
5.3.1 Técnicas de rádio	48
5.3.2 Escalabilidade	48
5.3.3 Conectividade <i>Mesh</i>	49
5.3.4 Largura de Banda e QoS (<i>Quality of Service</i>)	49
5.3.5 Compatibilidade e interoperabilidade	49
5.3.6 Segurança	49
5.3.7 Facilidade de utilização	49
5.4 Padrão IEEE <i>Mesh</i>	49
5.4.1 Padrão - 802.11s	50
5.4.2 Padrão - 802.15.5	52
5.4.3 Padrão - 802.16a	53
Capítulo 6: Trabalhos Relacionados	55
6.1 RoofNet	56
6.2 Microsoft Research	56
Capítulo 7: Avaliação de Desempenho	58
Capítulo 8: Estudo de Caso	60
8.1 Network Simulator (ns-2)	60
8.2 Cenários de simulação	60
8.3 Resultados Obtidos	62
Capítulo 9: Conclusões e Trabalhos Futuros	66
Referências Bibliográficas	67

Lista de Tabelas

2.1	Comparativo entre as tecnologias WPAN	22
2.2	Comparativo entre as tecnologias WLAN	22
3.1	Exemplo de tabela de roteamento	23
3.2	Diferença entre os fatores utilizados pelos algoritmos de roteamento.	24
4.1	Exemplo da tabela de roteamento utilizada pelo protocolo DSDV	28
4.2	Comportamento do nodo com os pacotes de controle baseado no <i>time to live</i> . . .	36
5.1	Diferença entre redes <i>ad-hoc</i> e redes <i>mesh</i>	43
8.1	Análise da vazão com a topologia para 50 nodos	62
8.2	Análise da vazão com a topologia para 50 nodos	63
8.3	Análise da vazão com a topologia para 51 nodos	63

Lista de Figuras

2.1	Área de abrangência da comunicação de acordo com as tecnologias.	19
2.2	Formação de uma rede ESS através da conexão de duas BSS por um sistema de distribuição.	20
2.3	Modelo de funcionamento de uma comunicação <i>multi-hop</i>	21
2.4	Comparação do padrão IEEE 802 com o modelo OSI da ISO.	22
3.1	Exemplo de rede formada por sete nodos roteadores.	24
4.1	Funcionamento do algoritmo de inundação	29
4.2	Funcionamento com os MPRs	29
4.3	Funcionamento da mensagem RREQ.	31
4.4	Funcionamento da mensagem RREP.	32
4.5	Formato do datagrama da mensagem RREQ	33
4.6	Formato do datagrama da mensagem RREP.	34
4.7	Formato do datagrama da mensagem RERR.	35
4.8	Formato do datagrama da mensagem RREP-ACK.	35
4.9	Componentes do protocolo <i>zone routing protocol</i>	37
4.10	Visão dos nodos com o protocolo FSR.	37
5.1	Exemplos de roteadores <i>mesh</i>	40
5.2	Exemplos de clientes <i>mesh</i>	40
5.3	Exemplo de arquitetura <i>mesh</i> com infra-estrutura.	41
5.4	Exemplo de arquitetura cliente <i>mesh</i>	41
5.5	Exemplo de arquitetura <i>mesh</i> híbrida.	42
5.6	Banda larga para usuários domésticos através de redes <i>mesh</i>	44
5.7	Redes <i>mesh</i> para a comunidade	45
5.8	Rede empresarial com solução <i>mesh</i>	45
5.9	Rede <i>mesh</i> MAN (<i>Metropolitan Area Networks</i>)	46
5.10	Sistema de transporte para rede <i>wireless mesh</i>	47
5.11	Rede <i>wireless mesh</i> para automatização de edifício	47
5.12	Redes sem fio (IEEE 802.11). (a) infra-estruturada; (b) <i>ad-hoc</i> ; (c) modo misto; (d) rede <i>mesh</i>	51
5.13	Arquitetura de redes <i>mesh</i> padrão IEEE 802.11s	51
5.14	Topologia de rede <i>mesh</i> WLAN.	52
5.15	Cálculo do número de nodos em cada ramo.	53
5.16	<i>Mesh</i> ART.	54
5.17	Ilustração do padrão IEEE 802.16a. (a) modo <i>point-to-multipoint</i> (b) modo <i>mesh</i>	54

6.1	Projeto Microsoft Research.	57
8.1	Disposição dos nodos na topologia malha com um nodo <i>sink</i> representado no eixo cartesiano (x,y).	61
8.2	Disposição dos nodos na topologia malha contendo dois nodos <i>sinks</i> representados no eixo cartesiano (x,y).	62
8.3	Gráfico obtido com as simulações para 50 nodos na rede.	65
8.4	Gráfico obtido com as simulações para 51 nodos na rede.	65

Lista de Símbolos e Abreviaturas

ACK *Acknowledge*

AODV *Ad-Hoc On-Demand Distance Vector*

AP *Access Point*

ART *Adaptive Robust Tree*

ARTT *ART Table*

BS *Base Estation*

BSS *Basic Service Set*

CSAIL *Computer Science and Artificial Intelligence Laboratory*

DBF *Distributed Bellman-Ford*

DSDV *Destination-Sequenced Distance-Vector*

DSR *Dynamic Source Routing*

DV *Distance Vector*

ESS *Extended Service Set*

ETT *Estimated Transmission Time*

ETX *Estimated Transmission Count*

FSR *Fisheye State Routing*

GSR *Global State Routing*

IARP *Intrazone Routing Protocol*

IBSS *Independent Basic Service Set*

IC *Intervalo de Confiança*

IEEE *Institute of Eletrical and Electronic Engineers*

IERP *Interzone Routing Protocol*

ISM *Industrial, Scientific and Medical*

ISO *International Organization for Standardization*

LAN *Local Area Network*

LMR *Lightweight Mobile Routing*

LOS *line-of-sight*

LR *Low Rate*

LS *Link State*

MAC *Medium Access Control*

MANET *Mobile Ad-hoc Network*

MAP *Mesh Access Point*

MART *Meshed Adaptive Robust Tree*

MIMD *Multiple Instructions Multiple Data*

MIT *Massachusetts Institute of Technology*

MP *Mesh Point*

MPP *Mesh Portal*

MPR *Multipoint Relays*

MWLAN *Mesh Wireless Local Area Network*

NIC *Network Interface Card*

NS *Network Simulator*

OLSR *Optimized Link State Routing Protocol*

OSI *Open Systems Interconnection*

PDA *Personal Digital Assistants*

PMP *Point-to-Multipoint*

PUCRS *Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul*

QoS *Quality of Service*

RIP *Routing Information Protocol*

RERR *Route Error*

RREP *Route Reply*

RREP-ACK *Route Reply Acknowledgment*

RREQ *Route Request*

RSSF *Rede de Sensores sem Fio*

SMP *Sensor Management Protocol*

STA *Estação*

SQDDP *Sensor Query and Data Dissemination Protocol*

TADAP *Task Assignment and Data Advertisement Protocol*

TCP *Transmission Control Protocol*

TORA *Temporally Ordered Routing Algorithm*

TTL *Time to Live*

WDS *Wireless Distribution System*

Wi-Fi *Wireless Fidelity*

WLAN *Wireless Local Area Network*

WLL *Wireless Local Loop*

WMAN *Wireless Metropolitan Area Network*

WMN *Wireless Mesh Network*

WPAN *Wireless Personal Area Network*

WRP *Wireless Routing Protocol*

WWAN *Wireless Wide Network*

ZRP *Zone Routing Protocol*

Capítulo 1

Introdução

O primeiro desenvolvimento de uma rede de pacote usando rádio para comunicação de computadores ocorreu em 1970 através do projeto ALOHANET desenvolvido na Universidade do Havaí. O ALOHANET consistia em uma rede de rádio usada para conectar os computadores da Universidade. A rede era de um único salto, ou seja, os nodos somente podiam comunicar-se diretamente. Posteriormente a rede de pacotes usando rádio cresceu em dois sentidos: em redes não militares, amadora e em redes militares táticas [1].

Recentes avanços nas área de comunicação sem fio e eletrônica embarcada têm habilitado o desenvolvimento de *hardwares* multifuncionais, a baixo custo e com um baixo consumo de energia [2]. Entretanto trabalhos em andamento no meio acadêmico e na indústria buscam tornar este consumo ainda mais eficiente, proporcionando uma maior robustez na aplicabilidade das redes sem fio em geral. Essas otimizações estão sendo aplicadas na melhoria de *hardware* e *software*, visando a utilização adequada dos protocolos de comunicação e configuração de ambientes de rede. Resultando em uma melhor utilização dos recursos computacionais.

Em consequência desses avanços e com o grande crescimento das redes *wireless-fidelity* (WI-FI), é proporcionado aos usuários uma maior portabilidade no acesso a dados e serviços em diversos locais. Isso motivou o desenvolvimento de novas tecnologias como as redes *wireless* do tipo *mesh*[3]. Estas redes, além de prover o acesso a redes convencionais do tipo *wired* e acesso a serviços de Internet, também proporcionam a integração de outras redes como: redes celulares, rede de sensores sem fio e mesmo redes do tipo IEEE 802.11, IEEE 802.15 e IEEE 802.16 [4].

Com isso a nova geração de redes *wireless* busca, principalmente, fornecer os serviços já oferecidos pelas redes *wireless* da atualidade, porém, com maior qualidade e eficiência. Essas funcionalidades são alcançadas através da tecnologia denominada *wireless mesh network* - WMN [4]. Esta tecnologia representa uma rede dinâmica, autoconfigurável e auto-organizável. Os nodos desta rede criam e mantêm automaticamente a conectividade, através principalmente da múltipla conexão entre nodos e vizinhos. A principal diferença entre redes *mesh* e redes *ad-hoc*, é que nas redes *mesh* os nodos possuem localização fixa, apesar da localização não ser pré-determinada. Conseqüentemente os algoritmos de roteamento apresentam muita semelhança entre si.

Em consequência da interoperabilidade que essas redes proporcionam e dos benefícios proporcionados por esta tecnologia, surgem ramos de pesquisam que buscam melhor utilizar estas características, dentre eles temos o desempenho destas redes quanto aos protocolos de roteamento.

1.1 Avaliação de Desempenho

Avaliar um sistema é pronunciar-se sobre as características do mesmo, ou seja, é realizar toda e qualquer observação sobre o mesmo. Com isso existem basicamente dois tipos de avaliação, qualitativa e quantitativa. Na avaliação qualitativa, existe a necessidade de uma comparação com o senso comum ou com valores de referência. A avaliação quantitativa baseia-se na formulação de valores específicos sem levar em consideração os méritos dos valores obtidos.

Inicialmente toda avaliação sugere um julgamento qualitativo do sistema, porém toda avaliação científica é feita sobre resultados quantitativos. Segundo [5] existem basicamente três técnicas de avaliação de desempenho: Monitoração, Simulação e Métodos Analíticos.

A monitoração trata da observação de sistemas reais, dentre as técnicas é a que maior proporciona a fidelidade dos dados obtidos. Contudo, isto pode levar há um elevado custo e longo tempo de análise no qual pode resultar no abandono da análise. A simulação trata de construir um modelo que simule o funcionamento do sistema a ser avaliado, descrevendo as características funcionais do sistema em uma escala adequada. Essa técnica contém detalhes importantes do sistema, porém já possui um certo nível de abstração [5].

Já os métodos analíticos baseiam-se como na simulação de um modelo do sistema real, porém o nível de abstração é bem maior, neste caso o modelo é puramente matemático, ou seja, o funcionamento é reduzido a relações matemáticas [5].

1.2 Protocolos de roteamento

Algoritmo de roteamento é “a parte do software da camada de rede responsável pela decisão sobre a linha de saída a ser usada na transmissão do pacote de entrada” [6]. Para esta tomada de decisão são levados em consideração alguns fatores como, por exemplo, o número de saltos e o estado do link.

Dentre as MANETs existem três tipos de protocolos de roteamento: pró-ativos, reativos e híbridos. O pró-ativo exige que os nós da rede mantenham a rota de todos possíveis destinos de modo que, quando houver necessidade do envio de um pacote de dados, a rota seja conhecida para ser usada, imediatamente. Já nos protocolos reativos, os nós descobrem os destinos sob-demanda, ou seja, não necessitam de uma rota para os destinos até que precisem enviar pacotes de dados para os destinos [7].

Os protocolos híbridos são aqueles que apenas um conjunto de nodos realiza atualização periódica sobre as informações de possíveis nodos destinos, tentando fazer uso conveniente das duas abordagens anteriores [8].

Com isso o trabalho apresenta como foco o roteamento em redes *mesh*, considerando que estas apresentam arquitetura diferente das *ad-hoc*, pois a mesma apresenta um *backbone* central na comunicação da rede.

1.3 Motivação

A necessidade da troca de informações fora dos ambientes tradicionais, interconectados através de redes *wired*, vem crescendo a cada dia conforme os dispositivos estão sendo produzidos, com menor tamanho e maior poder de processamento. Esta necessidade de troca de informações ocorre, por exemplo, através de empresários se encontrarem em aeroportos, estudantes necessitarem interagir durante a leitura de um texto ou mesmo equipes de resgates para coordenação durante algum desastre (incêndios ou furacão).

Cada um dos dispositivos usados por esses consumidores de informações pode ser considerado um nodo, formando uma rede *ad-hoc*, rede esta sem infra-estrutura onde a comunicação ocorre através dos próprios nodos. Estes nodos também conhecidos como nodos móveis realizam a troca de informações mesmo estando em movimento. A rede deve estar preparada para prover a mobilidade dos nodos, que é garantida através dos próprios nodos, visto que os nodos se comunicam diretamente entre si, proporcionando uma configuração da rede dinamicamente e não dependente das redes fixas (*wired*) conectadas entre as redes *wireless*.

Portanto surge a necessidade de oferecer estes serviços com qualidade e eficiência o que o roteamento tanto em redes *ad-hoc* quanto nas redes *mesh* pode proporcionar para estes clientes motivando com isso a pesquisa na área de roteamento nestas redes.

Por conseguinte, na presente proposta, será realizado um estudo criterioso nos protocolos de roteamento de redes *ad-hoc*, visando selecionar um que apresente tendência às características *mesh* e um bom desempenho no roteamento em redes *wireless*. Segundo [4], uma rede em que o número de saltos é igual ou superior a 4, a vazão da mesma não consegue ser razoável (para o 802.11b a vazão do TCP é mais baixa que 1.0 Mbps), o que significa que quando a escala da rede aumenta a vazão diminui, devido o tráfego dos dados passar por um maior número de nodos, onde cada mensagem recebida é enviada uma confirmação, pois trata-se de um protocolo confiável, o TCP.

1.4 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é a **investigação e avaliação de desempenho** de protocolos de roteamento de redes *ad-hoc* e sua adequação para redes *mesh*.

Os objetivos específicos são:

1. Estudo das tecnologias de redes sem fio;
2. Estudos de protocolos de roteamento existentes para redes *wireless*;
3. Investigação de trabalhos relacionados a avaliação de desempenho e protocolos de roteamento;
4. Investigação de estratégias para avaliação de desempenho;
5. Definição de estudos de caso;
6. Modelagem dos estudos de caso;
7. Avaliação de desempenho dos protocolos de roteamento; e
8. Definição de técnicas para melhoria dos protocolos existentes.

Este trabalho de pesquisa tem como objetivos específicos tanto à análise e o entendimento do funcionamento dos Protocolos de Roteamento para redes *wireless ad-hoc* quanto o comportamento destes protocolos em condições adversas na topologia da rede, visando o funcionamento destas redes com um bom desempenho, para que possam proporcionar uma conectividade estável nas redes do tipo *mesh*.

1.5 Estratégia para Desenvolvimento do Trabalho

Este trabalho foi desenvolvido com a seguinte estratégia: primeiramente é realizada uma demonstração dos conceitos básicos de redes *wireless*; em seguida é realizada uma pesquisa no estado da arte para maior compreensão da tecnologia estudada; a seguir são realizados experimentos através de simulações com o *Network Simulator (ns-2)* para a escolha do protocolo que apresente melhor desempenho.

1.6 Organização do Texto

O restante do trabalho encontra-se organizado e estruturado da seguinte forma:

- Capítulo 2: Apresenta o estado da arte das redes *wireless*, assim como os padrões IEEE estabelecidos para as redes em estudo;
- Capítulo 3: Apresenta os algoritmos de roteamento e conceitos necessários para o entendimento dos protocolos de roteamento;
- Capítulo 4: Apresenta o funcionamento e características dos protocolos de roteamento utilizados pelas redes *wireless*;
- Capítulo 5: Apresenta o estado da arte das redes *wireless mesh*, mostrando suas arquiteturas e características;
- Capítulo 6: Apresenta os trabalhos relacionados de avaliação de desempenho dos protocolos de roteamento, assim como, trabalhos de grupos de pesquisas nas redes *wireless mesh*;
- Capítulo 7: Apresenta os métodos utilizados para avaliação de desempenho dos protocolos de roteamento;
- Capítulo 8: Apresenta o estudo de caso proposto para a simulação na ferramenta *Network Simulator (ns-2)* e em seguida os resultados obtidos; e
- Capítulo 9: Este capítulo é reservado as conclusões e trabalhos futuros.

Capítulo 2

Redes *Wireless*

O termo *wireless* do inglês provém de *wire* (fio, cabo) *less* (sem), ou seja, sem cabos, sem fio. Portanto *wireless* caracteriza qualquer tipo de rede ou comunicação sem cabo. Uma rede *wireless* é uma rede onde a comunicação e transferência de dados ocorre através do ar, utilizando ondas de rádio em diversas frequências. Dentro deste modelo de comunicação enquadram-se vários outros que utilizam o ar como meio de transporte dos dados, entre eles temos: *Wi-Fi*, *InfraRed* (infravermelho), *Bluetooth* e *Wi-Max*. Estes modelos de comunicação se diferenciam pela frequência utilizada e pelo alcance da comunicação entre os dispositivos.

A Figura 2.1 mostra a classificação destas redes, onde as mesmas recebem as seguintes denominações: Redes Locais sem Fio (*Wireless Local Area Network* - WLAN), Redes Metropolitanas sem Fio (*Wireless Metropolitan Area Network* - WMAN), Redes de Longa Distância sem Fio (*Wireless Wide Network* - WWAN), Redes WLL (*Wireless Local Loop*) e Redes Pessoais sem Fio (*Wireless Personal Area Network* - WPAN) [9] [10].

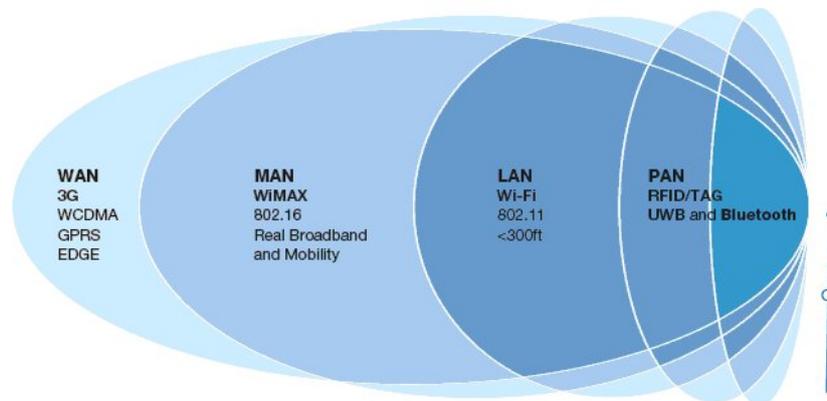


Figura 2.1: Área de abrangência da comunicação de acordo com as tecnologias.

As redes *wireless* são classificadas de acordo com a arquitetura adotada. Portanto descreveremos a seguir as classificações destas redes segundo [10]:

- Redes *ad-hoc* ou IBSS (*Independent Basic Service Set*): A comunicação entre as estações de trabalho é estabelecida diretamente, sem a necessidade de um *Access Point* (AP) ou de uma rede física para conectar as estações;

- Redes de Infra-estrutura Básica ou BSS (*Basic Service Set*): A comunicação entre as estações de trabalho ocorre através de *access points*, denominados coordenadores, onde os mesmos são responsáveis pelo repasse das mensagens entre os componentes da rede;
- Redes de Infra-estrutura ou ESS (*Extended Service Set*): Representam a união das redes BSS através de outras redes como, por exemplo, a *Ethernet* e os dispositivos podem permutar entre os *access points*.

As classificações descritas estão representadas na Figura 2.2, que apresenta a forma de conexão entre os nodos da rede.

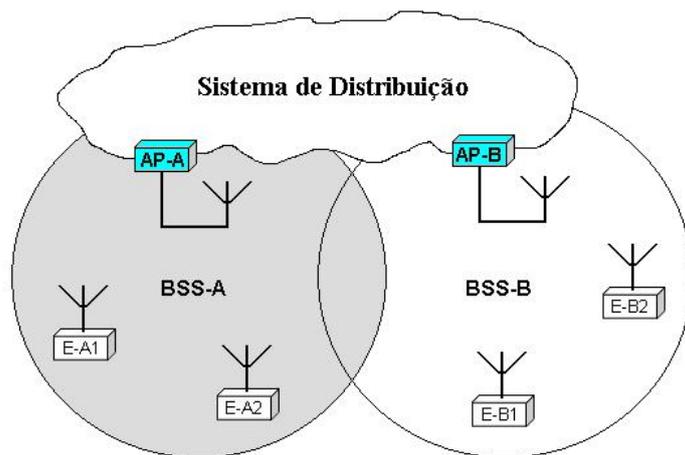


Figura 2.2: Formação de uma rede ESS através da conexão de duas BSS por um sistema de distribuição.

O E-A1 e o E-A2 representam quaisquer estações *wireless*, conectadas ao *access point* AP-A, o qual apresenta como área de alcance o raio do círculo representado pelo BSS-A, que indica uma rede com infra-estrutura básica. De forma equivalente os elementos E-B1, E-B2, AP-B e BSS-B possuem funções equivalente para uma outra rede, a rede “B”. Com a união das duas redes (rede “A” e “B”), com infra-estrutura básica através de um sistema de distribuição que pode ser tanto *wireless* quanto *wired* é formada a rede do tipo ESS, que possibilita a comunicação entre duas redes distintas.

2.1 Redes *Wireless Ad-hoc*

O termo *ad-hoc* do Latin significa literalmente “para isto”, todavia esta terminologia é entendida como algo criado com fins específicos ou imediatos. Apresenta também significado de “apenas para este propósito”, ou seja, uma aplicação temporária com finalidade única [11].

Uma rede *ad-hoc*, geralmente, não apresenta uma topologia pré-determinada, e nem controle centralizado, devido a sua dinamização quanto aos seus componentes. Portanto, não há necessidade de estruturas como *backbones* ou pontos de acesso configurados antecipadamente, uma vez que a comunicação ocorre sem conexão física e diretamente entre os nodos [11].

Em uma rede *wireless ad-hoc* a comunicação entre os dispositivos ocorre, principalmente, *multi-hop*, devido a comunicação entre os nodos ocorrer através de ondas de rádio, conseqüentemente os mesmos ficam limitados ao alcance dos sinais emitidos pelos seus *hardwares*. Por

isso os dispositivos funcionam tanto como roteadores quanto dispositivos terminais (*hosts*). Esta comunicação ocorre a partir da criação de uma rede “*on the fly*”, ou seja, um dispositivo faz parte da rede apenas se estiver se comunicando, ou, no caso de dispositivos portáteis, se estiver a uma certa proximidade do restante da rede.

Por não apresentarem uma topologia (específica) às redes *ad-hoc* apresentam algumas características como flexibilidade, ou seja, não há necessidade de instalação de cabos com isso torna possível a instalação em locais que o cabeamento estruturado tornar-se-ia inviável e portabilidade. E apresentam também algumas implicações como interferência de sinal, interoperabilidade, perda de caminho, segurança e gerenciamento de energia de forma eficiente até mesmo de dispositivos como notebooks e *personal digital assistants* (PDAs).

Mobile Ad-hoc Networks (MANETs) são redes do tipo *ad-hoc* no qual os dispositivos apresentam mobilidade, estes dispositivos são denominados de nodos móveis (NMs). Estas redes apresentam topologia dinâmica, devido à mobilidade dos nodos e a grande mudança em sua quantidade de nodos na rede [12].

As MANETs são redes que possuem rotas do tipo *multi-hop*, ou seja, os dados trafegam na rede através dos próprios nodos realizando vários saltos, como mostrado na Figura 2.3, onde os dados do nodo A são entregues ao destinatário (nodo D) percorrendo uma trajetória independentemente dos nodos intermediários, dependendo apenas do raio de alcance dos sinais e da localização do nodo destino.

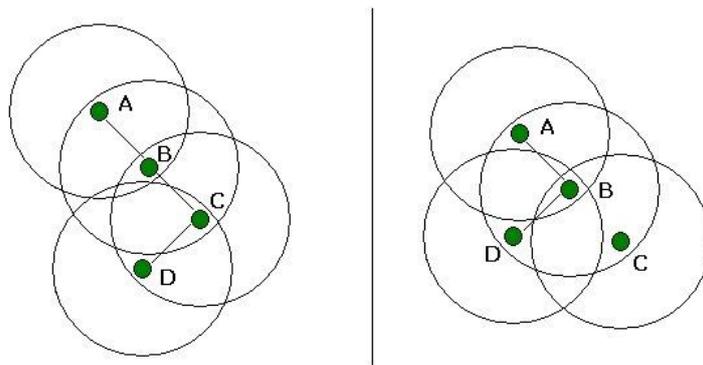


Figura 2.3: Modelo de funcionamento de uma comunicação *multi-hop*.

2.2 Padrões IEEE para Redes *Wireless*

O *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE), surgiu inicialmente com a união de dois institutos, um de Engenheiros Eletricistas e outro de Engenheiros de Telecomunicação, onde o mesmo tinha a finalidade de criar padrões para a indústria elétrica. Atualmente o IEEE é o instituto que visa compartilhar e integrar conhecimento na área de Tecnologia da eletricidade e tecnologia da informação. Para redes *wireless* o IEEE criou alguns padrões dentre eles temos: o WPAN (802.15) e o WLAN (802.11).

2.2.1 *Wireless Personal Area Network* - WPAN

Nesta categoria encontram-se as tecnologias *wireless* de pequeno campo de transmissão (em metros). A principal tecnologia deste grupo é o *Bluetooth* que é definida através do IEEE como

Tabela 2.1: Comparativo entre as tecnologias WPAN

Tecnologia	Frequência	Distância	Velocidade
802.15.1 (Bluetooth)	2.4Ghz	1 à 10 metros	720 Kbps
802.15.3 (HiperPan)	2.4Ghz	10 à 70 metros	11 - 55 Mbps
802.15.4 (ZigBee)	2.4Ghz	10 à 75 metros	20 - 250 Kbps

Tabela 2.2: Comparativo entre as tecnologias WLAN

Parâmetros	Frequência	Distância	Velocidade
HomeRF	2.4Ghz	50 metros	1Mbps
802.11	2.4Ghz	250 metros	1Mbps - 2Mbps
802.11a	5Ghz	8 à 25 metros	6Mbps - 54Mbps
802.11b	2.4Ghz	15 à 100 metros	5.5Mbps - 11Mbps
802.11g	2.4Ghz	50 metros	5.5Mbps - 54Mbps

sendo o padrão 802.15. A Tabela 2.1 [13] apresenta as características do Padrão IEEE 802.15.

O modelo OSI - *Open Systems Interconnection* [6] foi criado pela ISO - *International Organization for Standardization*, no início da década de 80, quando a ISO verificou a necessidade da comunicação entre pequenas redes que utilizassem sistemas operacionais distintos. Este modelo é baseado em camadas e tornou-se padrão para qualquer rede do tipo *wired*, podendo ser de curta, média ou longa distância [10]. Na Figura 2.4 [14] é mostrada uma comparação entre o modelo OSI da ISO e o modelo criado pelo IEEE para padronização das redes *wireless* WPAN (802.15.1).

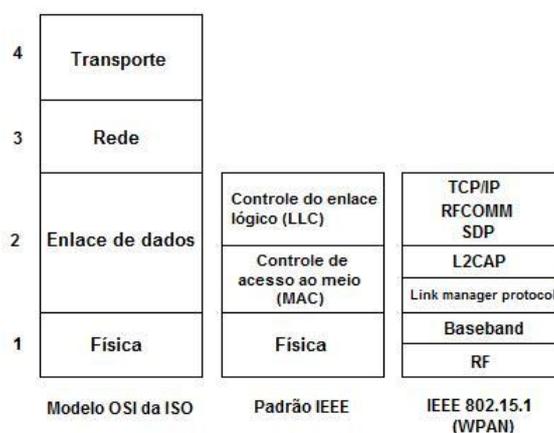


Figura 2.4: Comparação do padrão IEEE 802 com o modelo OSI da ISO.

2.2.2 Wireless Local Area Network - WLAN

Esta família é conhecida como *Wireless Fidelity* (Wi-Fi), apresenta um campo de transmissão médio e geralmente é utilizada para ambientes internos, esta tecnologia é definida através do padrão IEEE 802.11. O padrão 802.11 opera em duas frequências 2.4Ghz e 5Ghz, a seguir na Tabela 2.2 [15] é mostrada a tecnologia WLAN com suas respectivas características.

Capítulo 3

Algoritmos de Roteamento

Neste capítulo será mostrado o funcionamento e as características dos algoritmos de roteamento que originaram os principais protocolos de roteamento utilizados atualmente pelas redes *wireless*.

Dentro do modelo OSI da ISO a camada de rede é a que determina o caminho em que os pacotes de dados vão percorrer entre a origem e o destino, utilizando-se de parâmetros como: número de saltos, estado do *link* ou inundação.

Para a melhor compreensão deste capítulo, se faz necessário descrever o funcionamento destes parâmetros. **Número de saltos** é a quantidade de *hosts* que o pacote percorrerá até o destino ou mesmo a distância (em metros ou quilômetros) entre a origem e destino. **Estado do *link*** significa que cada roteador conhece o retardo dos *links* para cada um dos seus vizinhos, ou mesmo uma estimativa deste retardo. **A Inundação** significa que o pacote é enviado a todos os demais nodos, menos aquele que lhe enviou o pacote.

O roteamento trata-se de um serviço em que o roteador avalia os possíveis caminhos que um pacote poderá percorrer até seu destino, e estabelece qual o caminho este pacote deve seguir.

Para compreensão desses fatores a Figura 3.1 mostra uma rede com sete nodos, onde todos representam roteadores, com isso é apresentada uma tabela de roteamento tendo como referência o nodo *B* e o número de saltos respectivos para cada nodo da rede, ou seja, do nodo *B* para o nodo *F* são necessários dois saltos. A tabela de roteamento é atualizada sempre que a rota entre uma origem e um destino possua um menor custo em relação ao valor contido anteriormente na tabela. Por exemplo na Tabela 3.1 a coluna custo para alcançar o destino *D* possui o valor 2. Caso o valor seja alterado para 1 a Tabela precisa ser atualizada.

Tabela 3.1: Exemplo de tabela de roteamento

Destino	Custo	Próximo Salto
A	1	A
C	1	C
D	2	C
E	2	A
F	2	A
G	3	A

Já o estado do *link* não leva em consideração somente o número de saltos mas também outros fatores como, por exemplo, a largura de banda. A seguir na Tabela 3.2 é apresentado uma comparação entre estes dois fatores que os algoritmos de roteamento utilizam para a criação e manutenção de suas tabelas de roteamento.

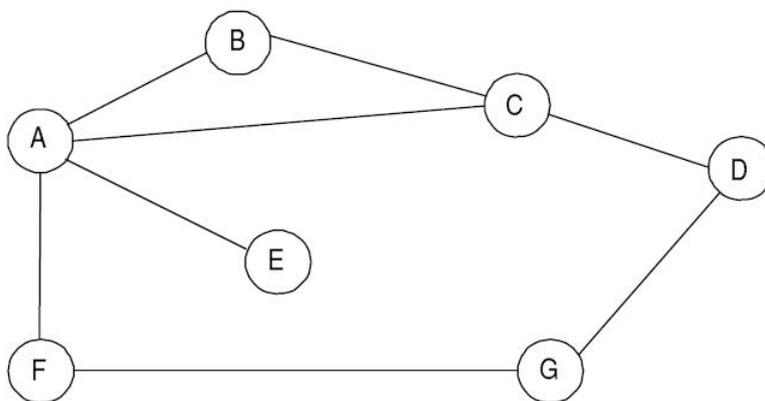


Figura 3.1: Exemplo de rede formada por sete nodos roteadores.

Tabela 3.2: Diferença entre os fatores utilizados pelos algoritmos de roteamento.

Vetor Distância	Estado do <i>Link</i>
Em cada nodo da rede, o algoritmo mantém uma tabela com a menor distância para cada destino.	Em cada nodo da rede, o algoritmo mantém uma tabela com o melhor caminho para cada destino.
Distância é medida pela quantidade de roteadores que o pacote tem de atravessar (<i>hop count</i>) até o destino.	Melhor caminho é definido com base em informações da rede (velocidade, atraso, taxa de ocupação de <i>links</i> , etc.)
Roteadores vizinhos trocam entre si informações à respeito de suas tabelas de roteamento (tabela inteira).	Roteadores vizinhos trocam informações entre si à respeito dos seus <i>links</i> (somente o que for alterado desde a última troca de informação).

Segundo [6] o roteamento pode ser dividido em dois tipos:

- Roteamento direto: a comunicação entre dois *hosts* ocorre diretamente, pois os mesmos encontram-se em uma mesma rede física [6].
- Roteamento indireto: a comunicação ocorre entre dois *hosts* que não se encontram na mesma rede física, havendo a necessidade de um *gateway* entre os *hosts* de origem e destino para a realização da comunicação [6].

Segundo [6] algoritmo de roteamento é “a parte do software da camada de rede responsável pela decisão sobre a linha de saída a ser usada na transmissão do pacote de entrada”. Os algoritmos de roteamento devem apresentar as seguintes propriedades:

- Correção: escolher de forma correta a melhor rota para o pacote;
- Simplicidade: o algoritmo deve oferecer os serviços com a quantidade mínima de processamento possível;
- Robustez: a topologia pode ser alterada ao longo do tempo, por falha de *hardware* e *softwares* de diversos tipos, contudo espera-se que a rede mantenha seu funcionamento contínuo por longo período de tempo sem a necessidade das tarefas serem interrompidas e que a rede seja reinicializada;

- Estabilidade: os algoritmos devem convergir a um equilíbrio independente do tempo de execução;
- Equidade: a distribuição da carga deve ser de modo justo entre os membros;
- Otimização: proporcionar o melhor caminho sempre e essa escolha deve ser feita o mais depressa possível.

Os algoritmos de roteamento dividem-se em duas classes, “não adaptativos” e “adaptativos” [6].

3.1 Algoritmos de roteamento não adaptativos (estático)

Nesses algoritmos a rota é calculada quando a rede é inicializada, não se baseia na topologia da rede.

Como exemplo deste algoritmo temos o algoritmo de Inundação (*Flooding*). Trata-se de um algoritmo estático, onde um *host* ao receber um pacote no qual ele não é o destino, envia a todos os outros hosts próximos exceto para o que lhe enviou o pacote. Com isso surgem várias replicações do pacote e o nodo de destino pode receber o mesmo pacote diversas vezes [6].

O *flooding* não tem muita utilização devido à quantidade de pacotes gerados, contudo para aplicações militares onde os roteadores podem ser facilmente destruídos a característica da robustez é bem desejável. Enquanto que ao aumentar o número de *hosts* dessa rede a largura de banda teria que aumentar ainda mais, pois o número de pacote de controle cresceria bastante [6].

3.2 Algoritmos de roteamento adaptativos (dinâmico)

Estes algoritmos baseiam-se na topologia da rede, a busca de informações ocorre através dos vizinhos, e as rotas são alteradas conforme estas alterações.

3.2.1 Vetor distância (*distance vector* - DV)

Devido a sua aplicabilidade para roteamento de pacotes na Internet o mesmo ficou conhecido como *Routing Information Protocol* (RIP) ou *Distributed Bellman-Ford* (DBF), este algoritmo consiste na idéia onde cada roteador mantém uma tabela (um vetor) contendo o menor caminho conhecido para cada destino [6].

Essas tabelas são atualizadas com a troca de mensagens com os vizinhos através da comparação da tabela recebida com a sua tabela, caso apresente uma melhor rota o mesmo atualiza sua tabela e armazena também a origem desta informação.

Isto acarreta sobrecarga de informações de controle na rede, e gera um problema chamado: **contagem ao infinito**, onde ao ser encontrada uma melhor rota esta informação é propagada rapidamente pela rede. No caso de redes *ad-hoc* isso se torna um problema ainda maior visto que os nodos se movem aleatoriamente e, portanto não possuem topologias fixas.

3.2.2 Estado do *link* (*link state* - LS)

Este algoritmo dinâmico surgiu com o propósito de solucionar o problema do roteamento com vetor distância, visto que se utilizava número de saltos até o destino, contudo para um pacote

chegar a um destino o mesmo poderia percorrer um caminho curto, ou seja, com poucos saltos. Porém, a largura de banda do *link* poderia ser pequena e o retardo maior [6].

Com isso o estado do *link* surgiu para encontrar as rotas eficientemente, não se preocupando somente com o número de saltos como também com as condições em que a rede se encontra. O roteamento pelo estado do *link* pode ser definido em cinco partes:

1. Descoberta dos vizinhos e seus endereços de rede;
2. Medir o retardo ou o custo para cada um de seus vizinhos;
3. Criar um pacote com as informações adquiridas anteriormente;
4. Enviar esse pacote aos demais roteadores;
5. Calcular o caminho mais curto para cada roteador.

Posteriormente pode ser utilizado o algoritmo de caminho mais curto (Dijkstra) [6] que realiza uma análise dos dados obtidos após estes cinco passos, para a descoberta da melhor rota para o pacote.

Capítulo 4

Protocolos de Roteamento para Redes *Wireless*

Dentre as redes *ad-hoc* existem três tipos de protocolos de roteamento: pró-ativos, reativos e híbridos. O pró-ativo exige que os nodos da rede mantenham a rota de todos possíveis destinos de modo que, quando houver necessidade do envio de um pacote de dados, a rota seja conhecida para ser usada, imediatamente [7]. Nos protocolos reativos, os nodos descobrem os destinos sob-demanda, ou seja, não necessitam de uma rota para os destinos até que precisem enviar pacotes de dados para os destinos [7]. Os protocolos híbridos são aqueles que apenas um conjunto de nodos realiza atualização periódica sobre as informações de possíveis nodos destinos, tentando fazer uso conveniente das duas abordagens anteriores [8].

4.1 Pró-ativos

São protocolos que exigem que todos os nodos da rede mantenham a rota de todos os possíveis destinos de modo que, quando houver necessidade do envio de um pacote de dados, a rota seja conhecida para ser usada, imediatamente. Estes protocolos realizam a utilização de suas tabelas de roteamento através de troca de mensagens continuamente [16, 7]. Como exemplos de protocolos pró-ativos têm-se: DSDV [17], OLSR e WRP.

4.1.1 *Destination-Sequenced Distance-Vector (DSDV)*

O protocolo DSDV é baseado no algoritmo vetor distância, ou seja, cada nodo da rede possui uma tabela com as informações que serão enviadas, por *broadcast*, e possuem também uma tabela de roteamento com todas as rotas para cada um dos nodos da rede e a quantidade de saltos para alcançar cada destino.

A tabela de roteamento é preenchida através de um campo chamado *destination sequence number*; o valor desse campo é informado pelo nodo destino durante o processo de descoberta da rota. Na tabela é realizada a manutenção da rota através do envio de mensagens periódicas por cada nodo, informando às alterações que ocorreram em suas tabelas devido às mudanças na topologia da rede. As mensagens para atualização de rotas são de dois tipos [17, 18]:

- Mensagens curtas: contendo apenas as últimas rotas que sofreram alguma modificação;

Tabela 4.1: Exemplo da tabela de roteamento utilizada pelo protocolo DSDV

Destino	Próximo Salto	Métrica (Salto)	Nº Seqüência	Tempo	Estab. Dados
A	A	0	A-846	1000	Ptr-A
B	B	1	B-470	1200	Ptr-B
C	B	3	C-920	1500	Ptr-C
D	B	4	D-502	1200	Ptr-D

- Mensagens completas: contendo toda informação da tabela de roteamento, gerando com isso uma grande quantidade de tráfego. Para evitar uma sobrecarga da rede essas mensagens devem ser enviadas com uma frequência relativamente baixa.

Ao realizar uma mudança na rede, como a perda de um determinado *link*, o nodo que percebe essa mudança altera a entrada na sua tabela para essa rota, indicando uma quantidade de saltos igual ao maior valor possível para esse campo. Alterando também o valor do *destination sequence number*, esse é o único caso onde a alteração desse campo é feita por um nodo que não é o próprio destino. Devido sua importância, essa alteração é imediatamente propagada pela rede pelo nodo que primeiro a percebeu, ou seja, essa mensagem de atualização não aguarda o momento em que as rotas modificadas são periodicamente disseminadas.

- O campo Destino aponta os possíveis nodos para o envio de informação na rede.
- O Próximo Salto indica para qual nodo vizinho deve ser enviada a informação que segue para um destino.
- A Métrica indica a quantos saltos este destino se encontra.
- O Nº de Seqüência informa o número criado pelo destino para garantir a ausência de loops.
- O Tempo de Registro serve para decidir o que deve ser descartado ou não.
- A Estabilidade dos Dados aponta para a tabela que guarda a informação que indica o quanto à rota é estável.

4.1.2 *Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)*

É um protocolo de roteamento desenvolvido para MANETs, trata-se de uma otimização do protocolo *link state*. O OLSR reduz o tamanho do pacote de controle assim como o número desses pacotes enviados para a rede, essa redução no número de pacotes de controle se dá através da utilização de *Multipoint Relays (MPR)*, que caracteriza o protocolo OLSR, o MPR é um nodo escolhido entre os vizinhos para enviar os pacotes de controle, essa escolha é realizada pelos vizinhos que estão apenas há um *hop* (salto) do nodo [19]. As Figuras 4.1 e 4.2 mostram o funcionamento de uma rede através do algoritmo de inundação normal e do protocolo OLSR com a utilização do MPR, representado na Figura 4.2 pelos nodos azuis.

Essa característica mostra a sua grande aplicabilidade em redes bastante densas, entretanto o nodo escolhido como MPR sempre repassa as informações da rede há todos que o escolheram, ou seja, repassa a visão de todos os componentes do grupo, o nodo para ser considerado como MPR precisa saber o estado do *link* de todos os seus vizinhos que se apresentem na distância de 1 e 2 *hops* (saltos) para que possa ser eleito através de políticas de eleições de grupo [20].

O OLSR é um protocolo pró-ativo que utiliza dois tipos de pacotes de controle, o *“hello”* e o TC (Controle de Topologia), o pacote *“hello”* é usado para a construção da vizinhança dos nodos,

ele é enviado para todos os nodos com um salto de distância, e serve também para a eleição do MPR; já o pacote TC é enviado a todos os nodos da rede através de *broadcast*, este pacote contém uma lista com o MPR do grupo. É usado um número de seqüência neste pacote para evitar a retransmissão infinita do mesmo, e um outro campo verifica a atualização do referido pacote. O pacote “*hello*” também é enviado por *broadcast* periodicamente para a verificação dos estados dos *links* que podem ser: assimétrico, simétrico ou MPR [21].

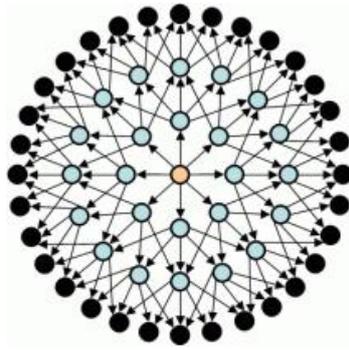


Figura 4.1: Funcionamento do algoritmo de inundação

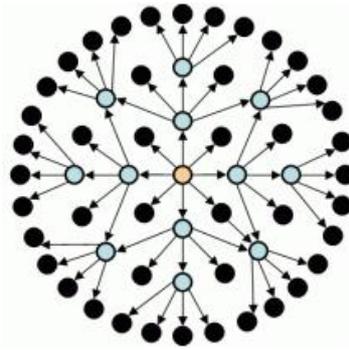


Figura 4.2: Funcionamento com os MPRs

Um nodo A envia um pacote “*hello*” ao nodo B com seu *status* assimétrico e o nodo B envia outro pacote “*hello*” ao nodo A com seu *status* assimétrico e também informa que é seu vizinho, na recepção deste, o nodo A coloca em sua tabela o nodo B com o *status* simétrico e envia outro pacote “*hello*” ao nodo B informando que o armazenou em sua tabela com *status* simétrico então B coloca em sua tabela novo *status* do nodo A, simétrico [21].

4.1.3 *Wireless Routing Protocol (WRP)*

O WRP é um protocolo pró-ativo, que utiliza mensagens de atualização (“*hello*”) para a descoberta e manutenção de rotas, contudo essas mensagens podem ser perdidas ou corrompidas devido a mudanças na topologia, por isso as mensagens de atualização são executadas em um meio de retransmissão, o que resulta a um nodo que recebeu uma mensagem de atualização deve gerar uma mensagem de confirmação (ACK) indicando com isso que há um enlace entre os nodos e que a mensagem de atualização foi processada pelo nodo destino. Um nodo pode emitir

apenas uma mensagem de atualização para todos os seus vizinhos, contudo todos os vizinhos devem responder esta mensagem com um ACK, pois caso não houver essa confirmação o nodo de origem atualiza a sua tabela como se o nodo que não respondeu não estivesse mais na sua proximidade [22].

Caso o nodo de origem não receba uma confirmação (ACK), receba uma mensagem que não seja de controle também atualiza a sua tabela de roteamento. A monitoração dos nodos da rede ocorre através do envio das mensagens de atualização e o tempo de intervalo entre duas mensagens de atualização é chamado de “*HelloInterval*”.

Caso um nodo não receba uma mensagem de atualização ou uma confirmação de um vizinho durante algum intervalo de tempo o nodo pode considerar que o *link* está perdido. Por exemplo, três vezes o *HelloInterval* significa que o *link* caiu.

No protocolo WRP cada nodo apresenta as seguintes tabelas [23, 22]:

- Tabela de distância;
 - Apresenta a distância para cada destino;
 - Apresenta a distância para cada vizinho.
- Tabela de roteamento;
 - Apresenta o identificador dos destinos;
 - Apresenta a distância para cada vizinho;
 - Apresenta o predecessor e o sucessor do trajeto mais curto escolhido.
- Tabela do custo do enlace;
 - Apresenta o custo do enlace para cada vizinho.
- Tabela da lista de retransmissão da mensagem (MRL);
 - Apresenta um número de seqüência da mensagem de atualização.

4.2 Reativos

São protocolos onde os nodos descobrem os destinos sob-demanda, ou seja, não necessitam de uma rota para os destinos até que os mesmos precisem enviar dados para os destinos, buscando a utilização eficiente de recursos como energia e largura de banda. Como exemplos de protocolos reativos têm-se: DSR [24], AODV [25], e TORA.

4.2.1 *Dynamic Source Routing* (DSR)

É um protocolo de roteamento sob demanda. Apresenta como principal característica a utilização de roteamento por fonte (*source routing*), para que, o nodo de origem do pacote conheça toda a rota, salto a salto até o nodo destino, permitindo à estação que originou o pacote possa determinar o caminho do mesmo pela rede até seu destino [26, 24].

O processo de descoberta da rota do nodo de origem funciona como mostrado a seguir: o nodo de origem envia através de difusão (*broadcasting*) para seus vizinhos um pacote de requisição de rota (RREQ), como mostrado na Figura 4.3, onde essa mensagem contém o endereço de origem, o destino da comunicação e o registro de rota. Com isso, cada nodo, após receber este pacote verifica em sua *cache* uma rota para o nodo destino, caso possua a rota, envia ao nodo origem um pacote de resposta contendo a seqüência de todos os nodos até o destino; e se não possuírem

a rota, inserem seus endereços no registro da rota e envia também por difusão para seus nós vizinhos [16].

Ao chegar o primeiro pacote RREQ ao destino é enviado um pacote RREP, conforme mostrado na Figura 4.4, informando o caminho da rede (rota) que o pacote deverá percorrer, posteriormente o nodo de origem inicia o envio dos dados, já sabendo o caminho que o mesmo irá percorrer. Consequentemente os nodos intermediários armazenam em *cache* as rotas que já foram descobertas, podendo serem utilizadas novamente sem a necessidade da descoberta da rota.

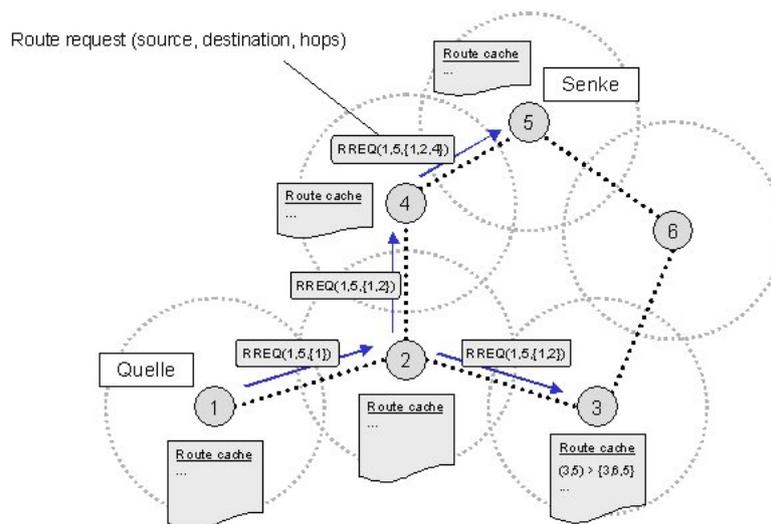


Figura 4.3: Funcionamento da mensagem RREQ.

4.2.2 *Ad-Hoc On-Demand Distance Vector (AODV)*

Trata-se também de um protocolo reativo, ou seja, a rota para um nodo destino só é descoberta quando se deseja enviar um pacote (dados) para este nodo; este protocolo permite o roteamento dinâmico, onde a rota do pacote pode ser alterada de acordo com a rota em que o dado está se deslocando, caso a rota utilizada esteja indisponível. Realizando a descoberta de forma rápida para novos destinos [26].

O AODV [25, 27] é um protocolo baseado no protocolo *Destination-Sequenced Distance-Vector (DSDV)* [17], criado basicamente para eliminar os erros do DSDV, como o problema de contagem ao infinito. Devido à mudança constante da topologia e o grande número de mensagens de controle entre os componentes da rede.

Durante a descoberta da rota, o protocolo AODV utiliza como mecanismo de armazenamento da rota uma tabela de roteamento tradicional, que armazena apenas uma entrada, ou seja, armazena apenas o próximo salto para o destino, diferenciando do DSR que armazena múltiplas rotas para um mesmo destino e também armazena a rota completa da origem ao destino [26].

O AODV foi projetado para ser utilizado em redes *ad-hoc* que apresentem desde pequenos números de nodos até milhares deles. O objetivo principal do protocolo é se adaptar, rápida e dinamicamente, às variações das condições dos *links* da rede, descobrindo rotas de forma a

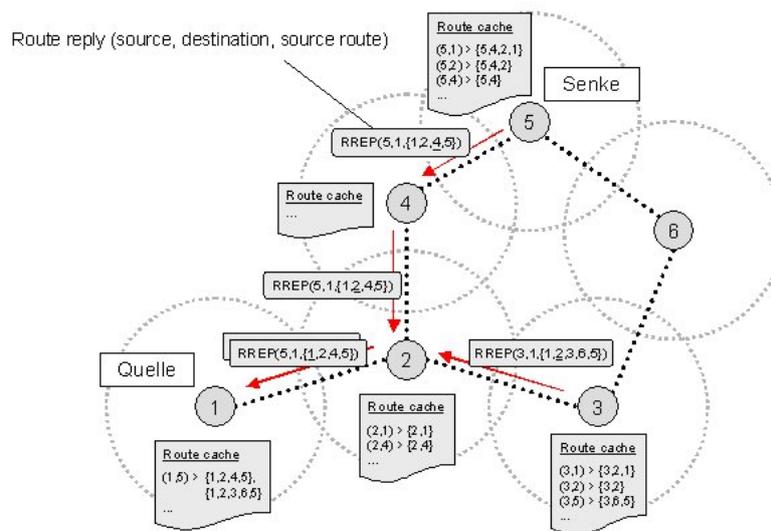


Figura 4.4: Funcionamento da mensagem RREP.

proporcionar um *QoS* (qualidade de serviço) desejável, evitando o desperdício de banda, minimizando o uso de memória e processamento nos nodos que atuam como roteadores.

Este tipo de protocolo pode ser utilizado em cenários de baixa, média e alta mobilidade, assim como lida com uma grande variedade de níveis de tráfego de dados, adaptando-se dinamicamente. O AODV apresenta quatro tipos de mensagens [28]:

1. *Route Request* (RREQ);
2. *Route Reply* (RREP)
3. *Route Error* (RERR)
4. *Route Reply Acknowledgment* (RREP-ACK)

RREQ é de formato similar ao DSR, contudo a conexão entre os nodos é bi-direcional e simétrico. O nodo de origem envia o RREQ aos nodos de seu alcance e os nodos enviam o RREP ao nodo de origem com isso a rede aumenta o seu tráfego de pacotes, pois toda requisição terá uma resposta.

Formato da Mensagem

- Mensagem de Requisição de Rota (*Route Request* - RREQ)

A mensagem *Route Request* é uma mensagem de requisição de rota enviada através de *broadcast* que realiza a disseminação do pedido de rota para os nodos da rede para que ocorra a transmissão de um dado (pacote) entre um nodo origem e outro nodo destino. A seguir é mostrado na Figura 4.5 o formato do datagrama da mensagem RREQ [28] que possui um total de 192 bits em seu tamanho original. Essa mensagem possui os seguintes campos:

1. *Type*: 1 - mensagem RREQ;

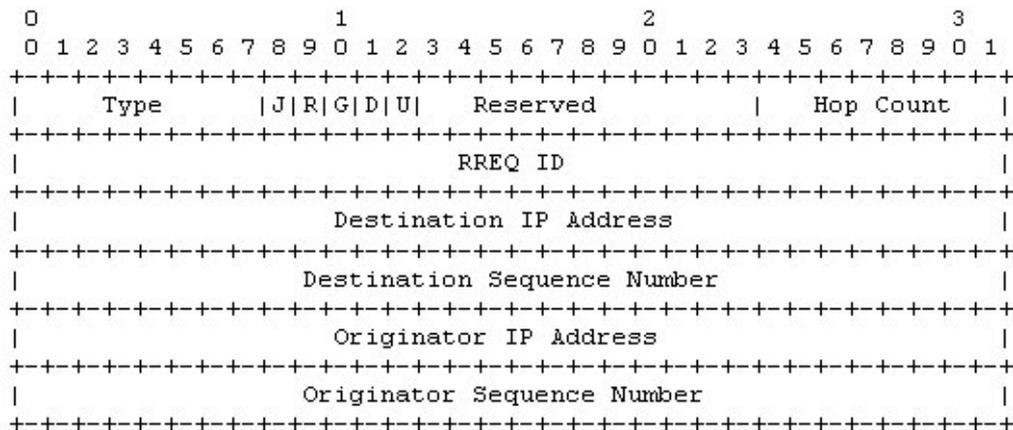


Figura 4.5: Formato do datagrama da mensagem RREQ

2. J: Reservado para *multicast*;
 3. R: Reservado para *multicast*;
 4. G: Indica se o RREP deve ser unicast ao nodo especificado no campo *Destination IP Address*;
 5. D: Indica que somente o destino pode responder ao RREQ;
 6. U: Número de seqüência desconhecido. O número de seqüência do destino é desconhecido;
 7. *Reserved*: Emitido como 0 (zero), deve ser ignorado na recepção;
 8. *Hop Count*: O número de saltos da fonte até o nodo que contém a mensagem de requisição, até o nodo que possui o pedido de rota;
 9. RREQ ID: Um número de seqüência que identifica o RREQ, juntamente com o endereço IP (Internet Protocol) do nodo de origem.
 10. *Destination IP Address*: O endereço IP do destino a rota desejada.
 11. *Destination Sequence Number*: O ultimo número de seqüência recebido de algum nodo para a descoberta da rota.
 12. *Originator IP Address*: O endereço IP do nodo que originou o pedido de rota.
 13. *Originator Sequence Number*: O número de seqüência atual a ser usado na entrada da rota que aponta para nodo de origem do RREQ.
- Mensagem de Resposta da Rota (*Route Reply* - RREP)

A mensagem *Route Reply* é uma mensagem de controle que informa a rota até o destino. Esta mensagem é enviada quando um nodo recebe um RREQ (mensagem de requisição de rota) e o mesmo é o destino ou possui informações sobre o destino em sua tabela de roteamento, respondendo qual o caminho que o pacote deverá percorrer na rede. A seguir é mostrado na Figura 4.6 o formato do datagrama da mensagem RREP [28], que possui os seguintes campos:

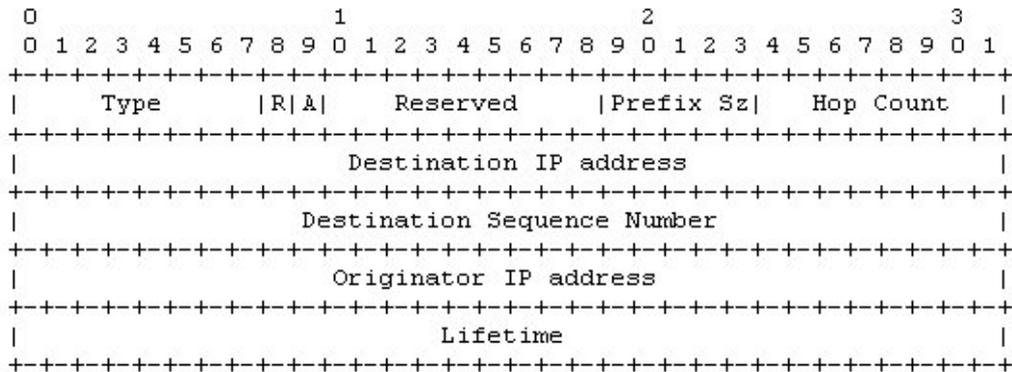


Figura 4.6: Formato do datagrama da mensagem RREP.

1. *Type*: 2 - mensagem RREP;
 2. R: Usado para *multicast*;
 3. A: Reconhecimento requerido (*Acknowledgment*);
 4. *Reserved*: Emitido como 0 (zero), deve ser ignorado na recepção;
 5. *Prefix Size*: Especifica o salto seguinte indicado pode ser usado por todos os nodos com o mesmo prefixo de roteamento;
 6. *Hop Count*: O número de saltos do endereço IP de origem até o endereço IP de destino;
 7. *Destination IP Address*: O endereço IP do destino para a rota fornecida;
 8. *Destination Sequence Number*: O número de seqüência do destino que associou a rota;
 9. *Originator IP Address*: O endereço IP do nodo que originou o RREQ para que a rota é fornecida;
 10. *Lifetime*: O tempo em milissegundos para que os nodos que receberam o RREP consideram a rota válida.
- Mensagem de Erro da Rota (*Route Error - RERR*)

A mensagem *Route Error* é uma mensagem de controle que informa quando uma rota está indisponível, inválida ou inexistente. Um nodo gera uma mensagem RERR e pode enviá-la a um ou mais nodos informando a falha na rota requisitada. A seguir é mostrado na Figura 4.7 o formato do datagrama da mensagem RERR [28], que possui os seguintes campos:

1. *Type*: 3 - mensagem RERR;
2. N: Não deletar a rota. Quando um nodo executou um reparo em um enlace os nodos acima não devem apagar a rota;
3. *Reserved*: Emitido como 0 (zero), deve ser ignorado na recepção;
4. *DestCount*: O número de destinos incluídos na mensagem. Deve apresentar pelo menos 1

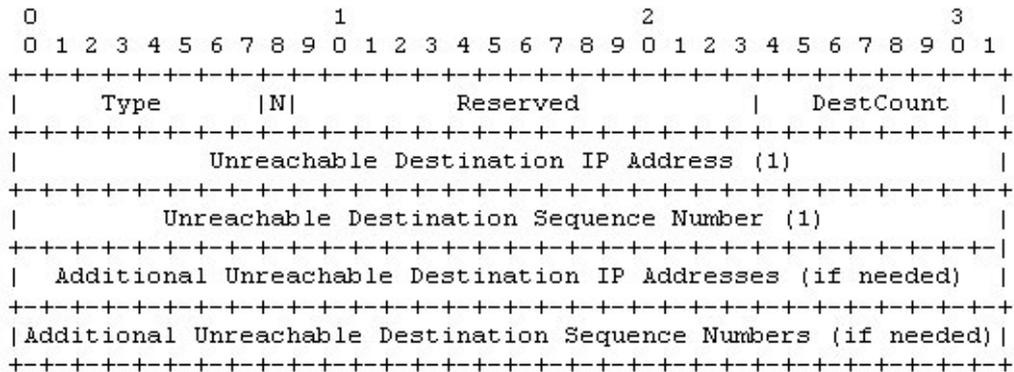


Figura 4.7: Formato do datagrama da mensagem RERR.

5. *Unreachable Destination IP Address*: O endereço IP de destino é tornado inalcançável devido à ruptura de um enlace
6. *Unreachable Destination Sequence Number*: O número de seqüência na entrada da tabela de roteamento para o destino está listado no campo Endereço IP do destino inalcançável
- Mensagem de Reconhecimento da Resposta da Rota (*Route Reply Acknowledgment - RREP-ACK*)

A mensagem *Route Reply Acknowledgment* é uma mensagem de controle que realiza a confirmação do recebimento pelo nodo de origem do RREQ. A seguir é mostrado na Figura 4.8 o formato do datagrama da mensagem RREP-ACK [28].

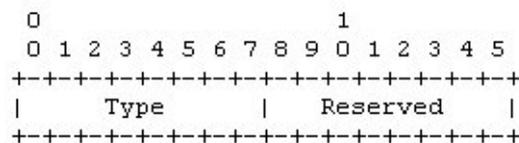


Figura 4.8: Formato do datagrama da mensagem RREP-ACK.

1. *Type*: 4 (mensagem RREP-ACK);
2. *Reserved*: Emitido como 0 (zero), deve ser ignorado na recepção.

4.2.3 Temporally Ordered Routing Algorithm (TORA)

Também se trata de um protocolo Reativo, que possui largura de banda eficiente e é livre de ciclos. É um algoritmo de roteamento distribuído altamente adaptável, baseado no conceito de *link* reverso (*link reversal*), ele é proposto para redes sem fio *multihop*, com mobilidade altamente dinâmica [29].

O TORA possui a propriedade de ser altamente adaptável e rápido na reparação da rota, durante uma possível falha, em virtude de apresentar múltiplas rotas para qualquer destino

Tabela 4.2: Comportamento do nodo com os pacotes de controle baseado no *time to live*

Time To Live (TTL)	Valor da Variável	
	1	0
Ação	Realiza atualização em sua tabela de roteamento	Descarta o pacote.

desejado, caracterizando o mesmo como protocolo apropriado a ambientes móveis *ad-hoc* com grande número de nós e de estrutura dinâmica.

Devido sua característica dinâmica, ele é adequado para minimizar o impacto da topologia da rede nas atualizações das tabelas de roteamento. Essa atualização é realizada através de mensagem a um pequeno grupo de nós próximos de onde ocorreu a mudança [30].

4.3 Híbridos

São protocolos onde, um conjunto de nodos, apenas uma parte dos nodos realiza atualização periódica sobre as informações de possíveis nodos destinos, tentando fazer uso conveniente das duas abordagens anteriores. Como exemplos de protocolos híbridos têm-se: ZRP e FSR [31].

4.3.1 Zone Routing Protocol (ZRP)

O ZRP trata-se de um protocolo híbrido, ou seja, pode ser tanto um protocolo pró-ativo quanto um protocolo reativo. Procura usar as vantagens dos protocolos pró-ativo e reativo, para a descoberta da vizinhança local utiliza a característica pró-ativa através do protocolo *Intrazone Routing Protocol* (IARP) e para a comunicação das vizinhanças utiliza técnicas reativas através do protocolo *Interzone Routing Protocol* (IERP). A comunicação ocorre com o protocolo *Broadcast Resolution Protocol* (BRP) no qual é responsável pela formação do pacote de requisição de rota [32].

O IARP é um protocolo pró-ativo baseado no protocolo estado do enlace onde cada nodo monitora seu estado do enlace, ou seja, monitora todos os seus vizinhos locais. Um nodo envia um pacote de controle a todos os seus vizinhos contendo informações dos seus enlaces e também um valor *time to live* (TTL) é carregado no pacote contendo um número igual a 1 o que significa que este pacote será apenas para os nodos vizinhos, onde cada nodo ao receber decrementa este valor do TTL, assim esta variável armazenará o valor igual a zero e quando um outro nodo receber este pacote deve rejeitá-lo, pois o valor é igual a zero, como mostrado na tabela 4.2, isto limita o pacote apenas a uma única zona.

A seguir na Figura 4.9 são mostrados os principais componentes [32] do protocolo ZRP como ocorre a comunicação entre eles e o protocolo IP (*internet protocol*).

4.3.2 Fisheye State Routing (FSR)

O FSR é um melhoramento do protocolo *Global State Routing* (GSR), e ambos são baseados no algoritmo de estado do *link*, contudo o GSR utiliza um grande número de mensagens de atualização, o que usa bastante largura de banda. No FSR a mensagem de atualização não contém informações sobre todos os nodos da rede, contém apenas informações dos vizinhos, que são identificados pelo número de saltos (*hops*). A informação sobre atualização é trocada com mais frequência entre os nodos próximos (*hop* = 1), o nodo central possui a informação exata

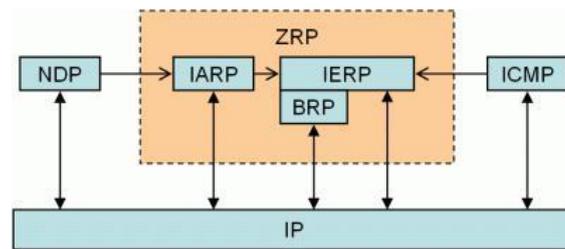


Figura 4.9: Componentes do protocolo *zone routing protocol*.

sobre todos os nodos do círculo interno e quando a distância aumenta a precisão da informação vai diminuindo, a visão do nodo central pode ser mostrada conforme a Figura 4.10 [33].

Como todos os nodos tem informações de seus vizinhos os pacotes estarão distribuídos corretamente. Isto significa que o protocolo apresenta um *overhead* bem controlado.

O protocolo FSR é similar ao *Link State (LS)* (descrito na seção 3.2.2) porque mantém um mapa cheio da topologia em cada nodo e como já mencionado a informação sobre o *link* é mais precisa dos nodos em sua volta e com isso o FSR pode imediatamente fornecer a informação da rota quando necessário.

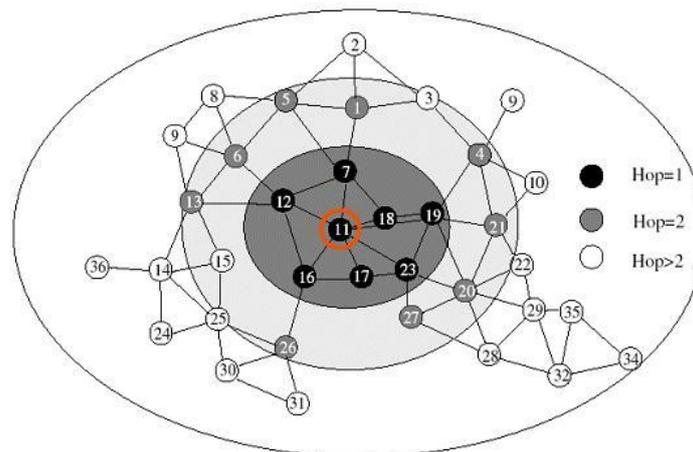


Figura 4.10: Visão dos nodos com o protocolo FSR.

O FSR é apropriado para redes com elevado número de nodos e ambientes altamente móveis, pois a informação de controle fica restrita ao número de saltos entre os nodos, caracterizando-se como um protocolo robusto. Contudo o protocolo apresenta uma complexidade de armazenamento em sua tabela de roteamento e exige grande quantidade de processamento [31].

Este capítulo buscou demonstrar o funcionamento e características dos protocolos de roteamentos das redes *wireless*, para que pudesse selecionar dentre eles os que possuísem as características necessárias das rede *mesh*, como, por exemplo, robustez. Além disso para hierarquizar quanto ao desempenho destes protocolos através de simulações e de monitoramento.

Capítulo 5

Redes *Wireless Mesh*

Com o surgimento em 1997, do padrão IEEE 802.11 (conhecido como *Wi-Fi*) [34], muitas aplicações vêm sendo criadas para esta tecnologia, porém estas aplicações dependem das redes fixas (*wired*) conectadas entre as redes *wireless*.

Com a necessidade de fornecer os serviços já oferecidos pelas redes *wireless* com maior qualidade e não dependente das redes *wired* surgiram às redes *mesh* ou *wireless mesh networks* (WMNs). Neste tipo de rede os nodos roteiam o tráfego entre si dinamicamente [4].

As redes *mesh* apresentam conectividade com mais de um nodo, possuindo algumas características interessantes, devido a comunicação nestas redes ser do tipo *multi-hop*, ou seja, a comunicação ocorre através dos próprios nodos, que funcionam tanto como *host* quanto como roteadores (conforme descrito na seção 2.1 pela Figura 2.3). Redes *mesh* possuem suporte para redes *ad-hoc* e capacidade de auto-formação, auto-manutenção e auto-organização [3, 4]. Apresentam também como características a dependência da mobilidade dos nodos *mesh*, pois os roteadores *mesh* apresentam mínima ou nenhuma mobilidade, devido os mesmo formarem o *backbone* central da rede, apesar dos clientes *mesh* possuírem também a capacidade de roteamento.

De forma semelhante as redes *ad-hoc*, as redes *mesh* possuem dependência quanto ao consumo de energia dos nodos da rede [4]. Os clientes *mesh* necessitam de protocolos adequados para um consumo eficiente de energia, diferentemente dos roteadores *mesh* que não possuem restrição ao consumo de energia. Porém, ao contrário das redes *ad-hoc* uma das características das redes *mesh* é infra-estrutura e formação da rede através de um *backbone wireless*.

Segundo [35, 3] as redes *mesh* são classificadas como ESS, pois são formadas basicamente por roteadores *mesh* e clientes *mesh*, por exemplo, na Figura 2.2 o sistema de distribuição representa o roteador *mesh* que realiza a conexão de duas rede distintas.

Por apresentar a característica de roteamento entre os nodos de forma dinâmica, estas redes assemelham-se as redes móveis *ad-hoc* também conhecidas como MANET [4]. A principal diferença entre as redes *mesh* e redes *ad-hoc*, é que nas redes *mesh* os nodos possuem localização fixa, apesar da localização não ser pré-determinada. Conseqüentemente os algoritmos de roteamento apresentam muita semelhança entre si.

As redes *mesh* permitem a integração de outras redes, onde os nodos convencionais equipados com cartões de interface de rede *wireless* (*network interface cards* - NICs) podem conectar diretamente a uma WMN através dos roteadores *mesh*. Conseqüentemente, as WMNs não representam um outro tipo de redes *ad-hoc* (descrito na seção 2.1), mas WMNs possuem as potencialidades das redes *ad-hoc* com a característica de possuir um *backbone* central da rede [4].

Devido as localizações dos nodos serem conhecidas, as redes *mesh*, também conhecidas como

rede de malha sem fio, podem ser utilizadas em diversas aplicações como *backup* distribuído, *cache* de conteúdo da Internet e divulgação de informação de relevância local como, por exemplo, propagandas e promoções do comércio local.

As redes *mesh* apresentam como vantagens o custo, robustez, escalabilidade (descrito na seção 5.3), simplicidade além das vantagens da própria tecnologia *wireless*. Robustez, é uma vantagem associada as redes *mesh* devido à mesma apresentar a característica dinâmica, onde ao modificar-se um *link* com a adição ou remoção de um nodo, ou mesmo através de interferência no *link* não implica em quebra da conectividade da rede, por consequência dos nodos estarem conectados a mais de um nodo, se adaptando as falhas sem interferência humana.

Portanto o custo das redes cai significativamente devido a não necessidade de manutenção na rede, além do custo dos *links* cabeados poderem incluir a necessidade de obras caras, trabalhosas e inconvenientes.

Porém, as redes *mesh* apresentam as seguintes desvantagens: degradação da largura de banda, interferência eletromagnética e perda freqüente de pacotes. Na degradação da largura de banda, os nodos de uma rede sem fio precisam utilizar a mesma freqüência, devido a isto somente um nodo pode transmitir de cada vez.

Nas arquiteturas sem fio convencionais, N nodos comunicam-se apenas com um nodo, que está ligado a uma rede fixa, nesta situação a largura de banda é dividida por N . Nas redes *mesh* este problema aumenta, pois cada nodo pode usar $1/N$ do tempo para transmitir os pacotes ao nodo mais próximo.

O problema de interferência eletromagnética é inerente a toda rede sem fio, visto que, os espectros utilizados são de uso livre e existem diversos equipamentos que utilizam a mesma freqüência, como telefones sem fio, fornos de micro-ondas e até mesmo equipamentos hospitalares que funcionam em freqüências abertas na banda ISM (*Industrial, Scientific e Medical*).

A perda freqüente de pacotes é causada pelas interferências e por obstáculos, pois os sinais de rádio possuem dificuldades para ultrapassar obstáculos, portanto é interessante uma linha de visão entre o transmissor e o receptor para que os pacotes não sejam perdidos.

Uma WMN consiste em dois tipos de nodos: os roteadores *mesh* e os clientes *mesh*, onde estes roteadores provem a conectividade entre os diversos clientes, podendo ser clientes *mesh* ou não, e também promovem a comunicação entres outros tipos de redes, formando o WDS - *Wireless Distribution System*.

Para garantir a flexibilidade das redes *mesh*, os roteadores são equipados com múltiplas interfaces *wireless* e em comparação com as redes *wireless* tradicionais as redes *mesh* podem conseguir a mesma cobertura com poder muito mais baixo da transmissão com as comunicações *multi-hop*.

Apesar dessas diferenças as redes *mesh* são construídas com uma plataforma de *hardware* similar, os roteadores podem ser construídos baseados em sistemas computacionais dedicados (por exemplo, sistemas embarcados) e em *hardwares* compactos como mostrado na Figura 5.1.

Os clientes *mesh* têm também as funções necessárias para redes *mesh* e com isso podem trabalhar como roteadores. Entretanto as funções de *gateway*¹ ou *bridge*² não existem nesses nodos. Conseqüentemente a plataforma de *hardware* e *software* pode ser muito mais simples do que os roteadores *mesh*. Os clientes são em maior número de dispositivos, podem ser PC *laptop/desktop*, *Pocket PC*, PDA, telefones IP, leitoras RFID, BACnet (automatização de edifício e redes de controle) entre outros dispositivos mostrados na Figura 5.2.

Segundo [36] as redes *mesh*, por apresentarem essas características, podem ser classificadas em três tipos de arquiteturas:

¹Possibilitam dividir a rede em segmentos autonomos. Com isso consegue-se reduzir o tráfego na rede toda

²Equipamento capaz de encaminhar dados entre duas ou mais redes diferentes.



Figura 5.1: Exemplos de roteadores *mesh*.



Figura 5.2: Exemplos de clientes *mesh*.

WMNs - Infra-estrutura/Backbone [36]

Esta arquitetura é mostrada na Figura 5.3, onde os traços e linhas contínuas indicam, respectivamente, comunicações *wireless* e *wired*. Este tipo inclui os roteadores *mesh* que dão forma à infra-estrutura para clientes *mesh*. O *backbone* pode ser construído usando vários tipos de tecnologia de rádio, porém o mais utilizado é o padrão IEEE 802.11. Os roteadores garantem a rede a auto-configuração e auto-manutenção, com funções de *gateway*, podendo ser conectados a Internet, proporcionando a integração com outros tipos de rede.

Os clientes convencionais podem ser conectados aos roteadores *mesh* através da *Ethernet*. Para clientes com mesma tecnologia de rádio, estes podem se conectar diretamente aos roteadores. Se a tecnologia de rádio for diferente, os clientes devem se comunicar com as estações bases e as mesmas comunicam-se com o *backbone* através de um meio *Ethernet*.

WMNs - Clientes [36]

Os clientes *mesh* realizam comunicação *peer-to-peer*. Nesse tipo de arquitetura os nodos clientes constituem a rede real para executar as funcionalidades de roteamento e de configuração,

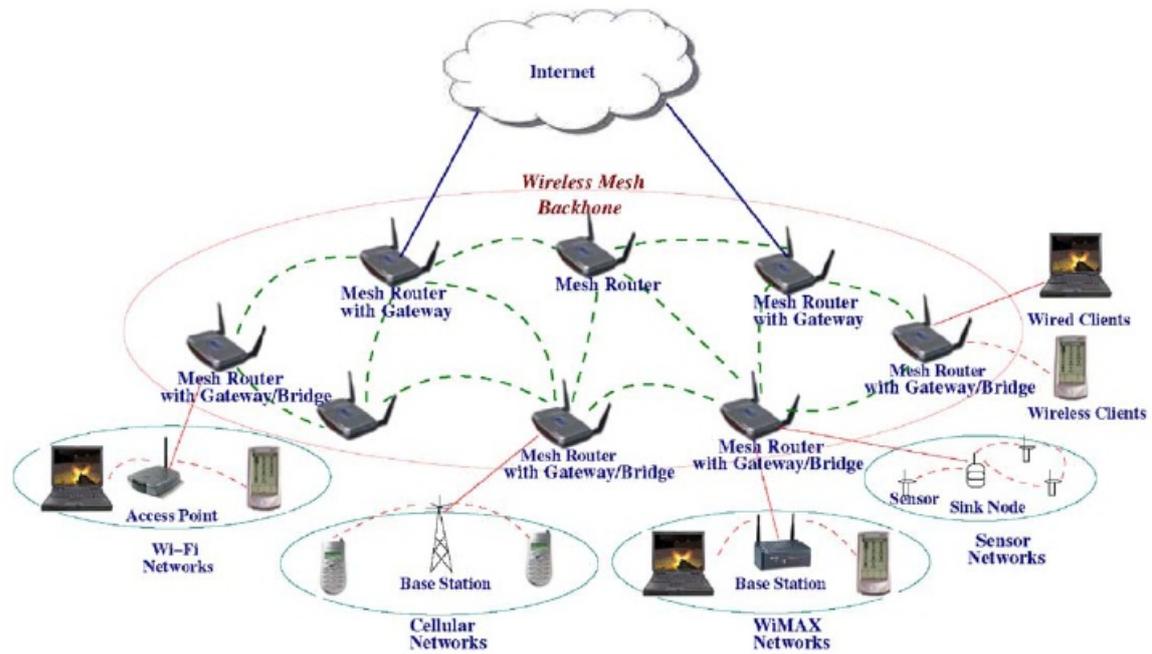


Figura 5.3: Exemplo de arquitetura *mesh* com infra-estrutura.

bem como fornecer as aplicações ao usuário final. A arquitetura básica é mostrada na Figura 5.4, esta arquitetura é formada usando apenas um tipo de tecnologia de rádio e as exigências dos clientes são aumentadas, pois os mesmos têm a função de roteadores e de auto-configuração da rede.

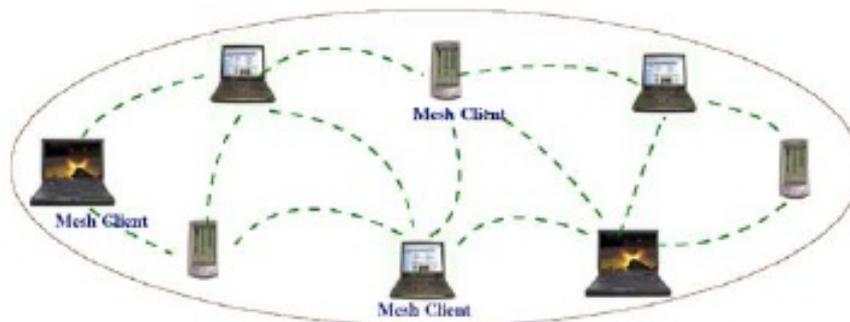


Figura 5.4: Exemplo de arquitetura cliente *mesh*.

WMNs - Híbridos [36]

Esta arquitetura é a combinação das arquiteturas com infra-estrutura e cliente *mesh*, como mostrado na Figura 5.5. Os clientes podem alcançar a rede através dos roteadores ou diretamente através de outros clientes, enquanto a infra-estrutura fornece conectividade a outras redes tais como, a Internet, Wi-Fi, Wi-MAX, celular e redes de sensores. Esta arquitetura torna-se a mais

aplicável, pois disponibiliza o acesso a todos os dispositivos.



Figura 5.5: Exemplo de arquitetura *mesh* híbrida.

5.1 Características

A escolha das redes *mesh* e o grande impulso que esta tecnologia está sofrendo resulta de suas características de auto-configuração, auto-manutenção, e do seu desenvolvimento ocorrer em tempo de execução, proporcionando um baixo custo de implantação e manutenção, caracterizando-a como uma rede robusta, capaz de se auto-recuperar e reabilitar.

Estas redes apresentam também outras características como [4]:

1. Comunicação *multi-hop*;
2. Suporte para rede *ad-hoc* e capacidade de auto-formação, auto-manutenção e auto-organização;
3. Dependência da mobilidade dos tipos de nodos *mesh*;
4. Vários tipos de acesso à rede;
5. Dependência quanto ao poder de consumo de energia dos nodos da rede;
6. Compatibilidade e interoperabilidade com redes *wireless* existentes;
7. Infra-estrutura e *backbone wireless*;
8. Roteamento e configuração dedicada;
9. Vários rádios;

Tabela 5.1: Diferença entre redes *ad-hoc* e redes *mesh*

Parâmetros	Redes <i>Ad-hoc</i>	Redes <i>Mesh</i>
Infra-estrutura	Sem infra-estrutura	Com infra-estrutura
Conectividade	Dependente apenas dos nodos da rede	Dependente do <i>backbone</i> central da rede
Roteamento	Os nodos da rede providenciam a entrega dos pacotes para os demais nodos da rede	O roteamento é realizado por roteadores <i>mesh</i> , economizando energia do usuário final
Rádio	Um rádio	Múltiplos rádios
Interoperabilidade	Comunicação somente entre os nodos.	Comunicação entre vários tipos de rede.

Como apresentado anteriormente às características das redes *mesh* são semelhantes às redes *ad-hoc*, onde os nodos promovem a conectividade de outros clientes, conectando-os ao *backbone* central da rede, porém estas redes se diferenciam conforme mostrado na Tabela 5.1.

Por apresentar estas características (principalmente comunicação *multi-hop*), nessas arquiteturas o roteamento nas redes *mesh* é realizado de forma semelhante ao roteamento nas redes *ad-hoc* [37]. Porém, as métricas utilizadas nas redes *mesh* são diferentes devido as mesmas fornecerem roteamento eficiente e com diferentes *QoS*, largura de banda, latência e a necessidade de segurança na rede.

Com isso a métrica de menor caminho (*shortest path*) [38, 39] utilizada pelos algoritmos de roteamento das redes *ad-hoc* não representam um único fator importante no roteamento em redes *mesh*. O estado do *link* da rede passa a ser o fator mais importante no roteamento dessas redes [37], devido, por exemplo, o nodo destino poder estar mais próximo. Contudo, a largura de banda pode ser pequena, resultando em uma maior latência na rede.

5.2 Cenários e Aplicações

As redes *mesh* além de prover a conectividade entre os nodos da rede, entre redes com ou sem infra-estrutura, e promoverem também o suporte necessário que as redes *wireless* (redes *ad-hoc*, celulares e as redes de sensores sem fio) atuais não proporcionam, com isso, estas redes vêm ganhando uma excelente aceitação no mercado, em diversos cenários e aplicações.

As redes *mesh* são aplicadas em vários cenários conforme o alcance da comunicação dos dispositivos entre si e dos dispositivos com o *backbone* central. Portanto as aplicações das redes *mesh* são divididas conforme a área de alcance e com isso de acordo com o grupo de pesquisa do IEEE onde foram criados os padrões 802.11s (WLAN *mesh*), 802.15.5 (LR-WPAN *mesh*) e 802.16a (WMAN *mesh*). Nos cenários de aplicações de redes *mesh* temos [4]:

5.2.1 Banda larga de usuários domésticos

Este cenário possui um problema óbvio, a posição dos Pontos de Acesso (*Mesh Router*) e possui geralmente locais inoperantes dentro da residência, ou seja, sem cobertura, a solução seria um exame do local, contudo é uma solução bastante cara e não prática, pois poderia haver a necessidade de muitos pontos de acesso para o *backbone* o que tornaria inviável, pois para o mesmo local uma solução a base de cabos (*Ethernet*) seria economicamente viável.

A Figura 5.6 mostra como seria uma possível topologia de uma rede *mesh* dentro de uma residência.



Figura 5.6: Banda larga para usuários domésticos através de redes *mesh*

5.2.2 Rede da comunidade e da vizinhança

Em uma comunidade a arquitetura comum para o acesso à rede é baseada em cabo ou ADSL ligada à internet. Porém este tipo de acesso tem diversos inconvenientes:

- Caso uma informação deva ser compartilhada entre a vizinhança todo tráfego deve ser através da internet;
- Grandes porcentagens entre as casas não são cobertas pelos serviços *wireless*;
- Uma passagem cara entre as casas ou vizinhanças inviabilizando a comunicação e os serviços *wireless* devem ser ajustados individualmente, dentro de cada residência, consequentemente os custos da rede podem aumentar;
- Somente um caminho pode estar disponível para o acesso a Internet ou para o acesso a vizinhança.

Como mostrado anteriormente as redes *mesh* apresentam algumas desvantagens por apresentar a conectividade flexível entre as residências conforme pode ser observado na Figura 5.7, porém apresenta muitas vantagens como: o armazenamento distribuído de arquivos, o acesso a arquivos distribuídos e um fluxo de vídeo entre as residências.

5.2.3 Rede Empresarial

Esta pode ser uma rede pequena ou uma rede média dentro de um escritório ou para todos os escritórios de um edifício inteiro ou uma rede de grande escala entre escritórios em edifícios distintos.

Atualmente essas redes são formadas pelas redes wireless IEEE 802.11, contudo elas não são interligadas ou apresentam conexão através de redes *wired* (*Ethernet*), o que torna o custo bastante significativo dentro da rede da empresa, devido o *link* externo possui um elevado custo, além da necessidade de mais um modem para o acesso externo, que aumenta a capacidade interna,

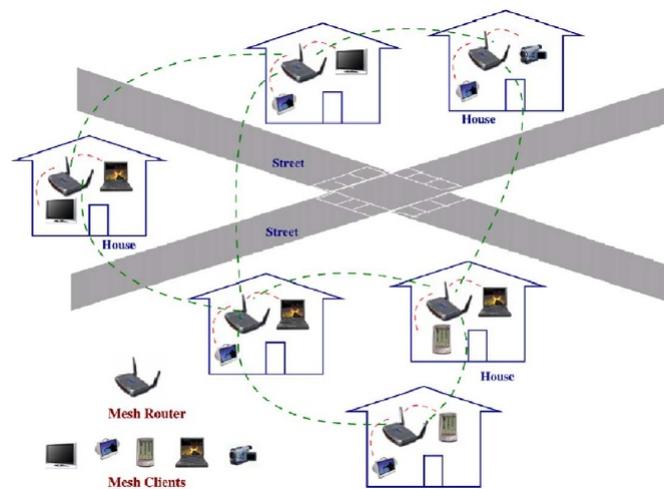


Figura 5.7: Redes *mesh* para a comunidade

mais não a torna mais robusta, deixando tolerante a falhas, pois possuía um único *hardware* de saída.

Já se os pontos de acesso forem substituídos por roteadores *mesh* como mostrado na figura 5.8 os fios *Ethernet* podem ser eliminados e o acesso externo pode ser compartilhados pelos roteadores tornando-a mais robusta e melhora a utilização dos recursos da rede como a banda interna.

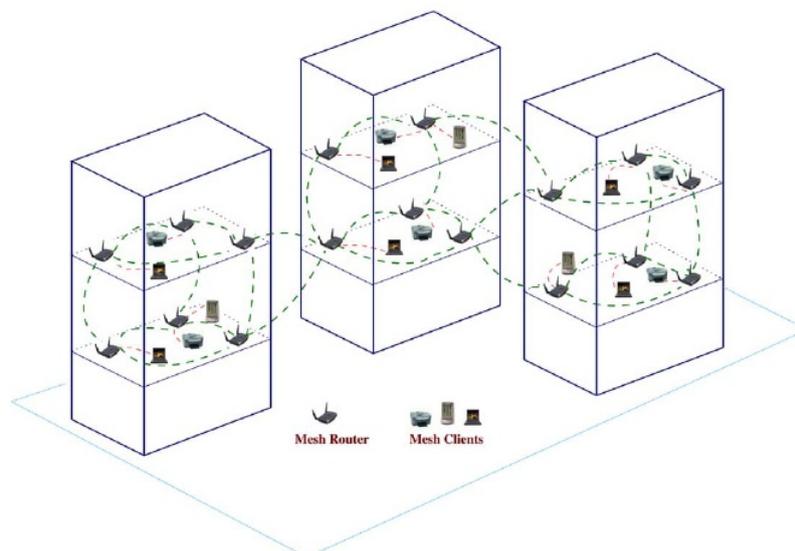


Figura 5.8: Rede empresarial com solução *mesh*.

As redes empresariais são mais complexas do que as redes residenciais devido apresentar mais dispositivos e uma maior área com isso ficam mais sujeita a locais sem conectividade den-

tro do escritório ou do edifício, portando a usabilidade da rede aumenta com a mesma sendo implementada a partir de roteadores *mesh*.

O modelo de rede empresarial pode ser aplicado em muitos outros locais como: hotéis, aeroportos, centro de convenções, centro de esportes, *shopping*, cenários comerciais entre outros.

5.2.4 Redes de Área Metropolitana

Uma rede *mesh* em uma área metropolitana apresenta diversas vantagens, dentre elas temos: a taxa de transferência da camada física das redes *mesh* são superiores as taxas de todas as redes celulares [4], além disso, uma comunicação *mesh* não depende de uma *backbone wired*. A rede *mesh* MAN, em comparação com as redes *wired* e redes ópticas são uma alternativa de banda larga mais econômicas especialmente em regiões não desenvolvidas.

A rede *mesh* MAN cobre uma área muito maior do que as redes residenciais, empresariais, ou as das comunidades, conforme mostrado na Figura 5.9. Com isso a exigência com a escalabilidade (descrito na seção 5.3) da rede *mesh* MAN é muito maior.

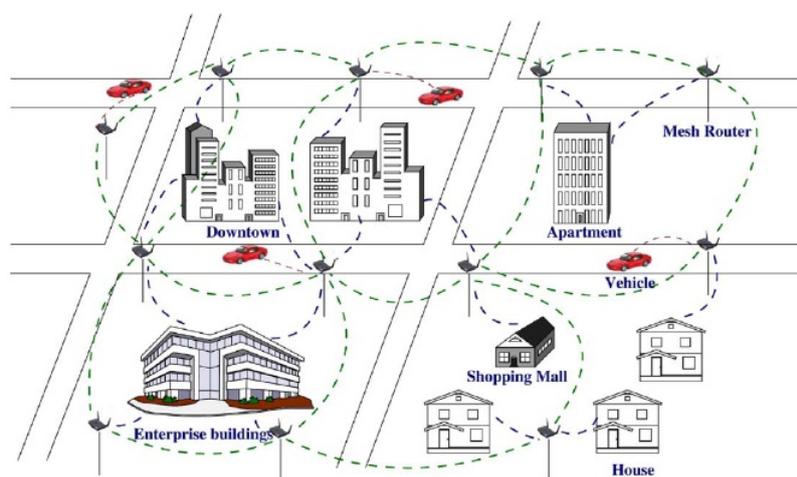


Figura 5.9: Rede *mesh* MAN (*Metropolitan Area Networks*)

5.2.5 Sistemas de Transporte

A tecnologia de rede *mesh* estendia para o funcionamento em ônibus, balsas e trens, proporcionando aos passageiros além de serviços de informações pertinentes ao perfil do usuário, proporciona também a monitoração remota de vídeos de segurança em seu veículo ou na sua residência.

Para permitir tal serviço através das redes *mesh* são necessárias duas técnicas:

- *Backhaul* móvel de alta velocidade do veículo (ônibus, balsas ou trens) a internet;
- Redes *mesh* móveis dentro dos veículos, como mostrado na Figura 5.10;

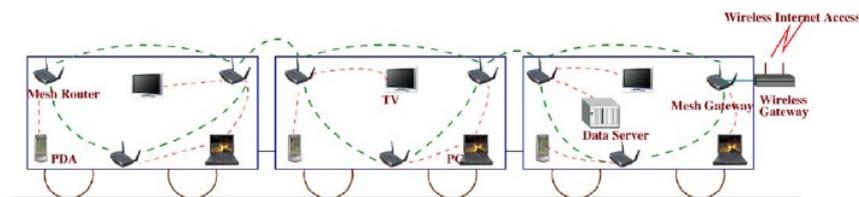


Figura 5.10: Sistema de transporte para rede *wireless mesh*

5.2.6 Automatização de Edifício

Em edifícios a automação existe em vários dispositivos elétricos, como em luzes, elevadores, circuitos internos, ar condicionado e etc. Porém há necessidade da gerência destes dispositivos que normalmente é realizado por redes padrão do tipo *wired*, o que caracteriza um serviço bastante caro devido à complexidade na implantação e na manutenção das redes *wired*.

As redes *Wi-Fi* têm sido adotadas para redução dos custos desses serviços, porém ainda não consegue um desempenho satisfatório devido às redes *Ethernet* para estas aplicações ainda possuírem um menor custo.

Se os pontos de acesso BACnet (redes de automação e controle de edifícios) forem substituídos por roteadores *mesh* como mostrado na Figura 5.11 os custos serão reduzidos significativamente, simplificando também o processo de implantação desses sistemas.

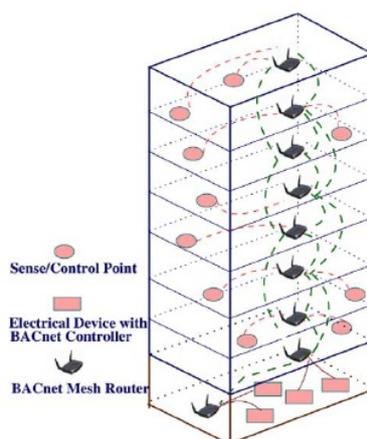


Figura 5.11: Rede *wireless mesh* para automatização de edifício

5.2.7 Saúde e Sistemas médicos

Em um hospital ou em um centro médico, muitos dados de monitoração e diagnósticos necessitam ser trafegados entre os quartos e entre o centro de monitoração para melhor acompanhamento dos pacientes. Com isso faz-se necessário uma excelente infraestrutura de rede, geralmente redes do tipo cabeada (*wired*) em conseqüência do grande tráfego, por exemplo, de imagens de alta definição, que podem consumir grande largura de banda.

Porém as redes do tipo *wired* proporcionam aos dispositivos médicos fixos conexão limitada à tecnologia (por exemplo, *Ethernet*) e as redes sem fio tradicionais (*Wi-Fi*) dependem e confiam

na infra-estrutura proporcionada pelas redes *Ethernet*, resultando em um elevado custo, e podem acarretar também alguns pontos inoperantes dentro da rede, devido a limitação do alcance dos rádios. Contudo essas funcionalidades na área médica não existem em redes *wireless mesh networks*.

Conforme descrito nesta seção as redes *mesh* possuem diversos cenários, devido a suas características de portabilidade e interoperabilidade, portanto podem ser implementadas também em áreas de cobertura extensa, como: campi universitários e estádios; ou em área de difícil instalação dos cabos como: estradas, prédios históricos; e também em situações de emergência como, por exemplo, em operações militares ou em incêndios.

5.3 Fatores críticos que influenciam o desempenho da rede

Nas redes *mesh* durante as fases de projeto, desenvolvimento e operação necessitam ser avaliados os fatores que influenciam e que influenciaram o desempenho da rede. Estes fatores críticos são descritos a seguir [4]:

5.3.1 Técnicas de rádio

Devido o rápido progresso de semicondutores e das tecnologias RF (rádio frequência) juntamente com a teoria da comunicação, os rádios *wireless* submeteram-se a uma significativa revolução. Com finalidade de maior capacidade e flexibilidade dos sistemas *wireless*, esta tecnologia tem utilizado antenas direcionais, antenas *smart*, sistemas MIMO [40, 41] e sistemas multi-rádio e multi-canal [42, 43]. Atualmente os *chipsets* de multi-rádio e suas plataformas de desenvolvimento estão disponíveis no mercado.

Para melhorar o desempenho e controle de um rádio *wireless* através de protocolos de camada mais elevada, a indústria está utilizando tecnologias mais avançadas, tais como rádios reconfiguráveis, rádio frequência ágil/cognitiva [44, 45], e rádio de *softwares*. Porém, estas tecnologias de rádio estão ainda no início, com isso espera-se ser uma plataforma futura das redes *wireless* devido a sua potencialidade dinâmica de controle dos rádios. Essas tecnologias requerem um projeto mais avançado nas camadas de protocolos, em especial os protocolos da camada MAC e os protocolos de roteamento. Ao levar em consideração os rádios de *softwares* é necessário ser desenvolvido protocolos MAC mais avançado, tais como MAC programável.

5.3.2 Escalabilidade

Em uma rede *wireless mesh* a comunicação geralmente ocorre da forma *multi-hop* e portanto ao aumentar o tamanho da rede o desempenho da mesma se degrada significativamente. Protocolos de roteamento podem não encontrar um caminho confiável, os protocolos de transporte podem afrouxar a conexão, e os protocolos da camada MAC podem experimentar uma significativa redução na vazão da rede.

Segundo [4], o protocolo MAC atual do padrão IEEE 802.11 não conseguem atingir uma vazão razoável enquanto o número de saltos for igual a 4 ou superior (para o 802.11b a vazão do TCP é mais baixa que 1.0 Mbps).

De acordo com [46] escalabilidade é uma característica desejável em qualquer sistema, em uma rede ou em um processo, que indica sua habilidade de manipular uma porção crescente de trabalho de maneira uniforme, ou estar preparado para o crescimento do mesmo.

5.3.3 Conectividade *Mesh*

Muitas vantagens das redes *mesh* são originadas da conectividade *mesh* que é uma exigência crítica no projeto do protocolo, especialmente o protocolo MAC e os protocolos de roteamento. Os algoritmos de controle e de alto-organização da topologia da rede são também necessários.

Os protocolos de roteamento e MAC podem melhorar significativamente o desempenho das redes *wireless mesh*.

5.3.4 Largura de Banda e QoS (*Quality of Service*)

Em contrapartida as redes *ad-hoc* tradicionais, as redes *mesh* utilizam-se de alta largura de banda com exigência de qualidade nos serviços oferecidos. Além da transmissão fim-a-fim estas redes consideram o atraso bastante significativo na comunicação, com isso as métricas de desempenho das redes *mesh* são: vazão, variação do atraso e a relação de perda de pacote.

5.3.5 Compatibilidade e interoperabilidade

O suporte a clientes convencionais e clientes *mesh* é uma característica desejável em redes *mesh*, portanto as redes WMNs necessitam ser compatíveis com os nodos convencionais. Essa integração das redes *mesh* com as demais redes *wireless* requer roteadores *mesh* com potencialidade de interoperabilização entre redes *wireless* heterogêneas.

5.3.6 Segurança

Embora muitos esquemas de segurança sejam propostos para redes WLANs, eles não podem ser utilizados nas redes WMNs devido a estas redes possuírem uma arquitetura distribuída diferentemente das redes *wireless* tradicionais. Os esquemas existentes para redes *ad-hoc* podem ser adotados pelas redes *mesh*, contudo por apresentar arquitetura distribuída é necessário o planejamento de novos algoritmos de criptografia e de distribuição da chave de segurança, protocolos de roteamento e MAC seguros, detecção de intrusos, e necessidade de monitoração da segurança.

5.3.7 Facilidade de utilização

Os protocolos devem ser projetados para que a rede seja tão autônoma quanto possível, no sentido de gerência de energia, auto-organização, controle dinâmico de topologia, robustez visando uma falha provisória nos *links* e ao procedimento rápido de subscrição da rede, ou seja, autenticação rápida do usuário na rede.

As ferramentas de gerência de rede precisam ser desenvolvidas para manter as operações de forma eficiente, monitorar o desempenho e configurar os parâmetros de uma WMN. Estas ferramentas em conjunto com os mecanismos autônomos dos protocolos permitirão o desenvolvimento rápido das redes WMNs.

5.4 Padrão IEEE *Mesh*

O padrão IEEE trata-se de especificações criadas a partir de grupos de estudos, onde os fabricantes e projetistas de *hardwares* e *softwares* baseiam-se para a construção dos equipamentos para que os mesmos funcionem de forma homogênea em vários tipos de sistemas, proporcionando os serviços desejados. Nesta seção serão mostrados os padrões IEEE de redes *mesh*.

5.4.1 Padrão - 802.11s

Atualmente os padrões IEEE atingem uma taxa de velocidade de 11Mbps (IEEE 802.11b) e 54Mbps (IEEE 802.11 a/b), porém os pesquisadores do padrão IEEE 802.11n esperam aumentar esta taxa de transferência cerca de 10 a 20 vezes, embora os usuários domésticos ainda não utilizarem esta taxa de transferência, devido os serviços ADSL oferecidos ou *hardware* não suportar a referida tecnologia [4].

O padrão 802.11 continua a avançar em vários segmentos, por exemplo, 802.11e para *QoS* e 802.11n para uma vazão de dados acima de 100Mb/s. Esses padrões são limitados porque dependem das redes do tipo *wired* e da não especificação do sistema de distribuição sem fio (*Wireless Distribution System - WDS*).

As redes *mesh* utilizadas pelo mercado estão com um elevado custo, equivalentes às redes sem fio no final da década de noventa com o surgimento das redes Wi-Fi (*Wireless Fidelity*). Em virtude do elevado custo e dos protocolos utilizados pelas redes *ad-hoc* serem inadequados para redes *multi-hop* proporcionou a formação recente de um novo grupo de pesquisa do IEEE, o grupo chamado: “IEEE 802.11s ESS Mesh”, formado em maio de 2004, com objetivo de padronizar *Extended Service Set - ESS* [35, 3].

Como os usuários e *access points* são adicionados aleatoriamente nas redes ocorre um aumento da capacidade da rede, equivalente a rede Internet, proporcionando uma arquitetura escalável e redundante. As definições adiantadas deste grupo são: definição de uma WMN, casos de uso, *Quality of Service (QoS)*, especificações da arquitetura, de segurança, de protocolos do roteamento, e de desenvolvimento de novos protocolos MAC [4].

A atividade do grupo 802.11s consiste na especificação do novo protocolo para instalação, configuração e operação das WLANs *Mesh*. Essas especificações incluem a camada física dos padrões IEEE 802.11 a/b/g/n que operam nas frequências não licenciadas 2.4 e 5Ghz.

Neste padrão são esperadas especificações da camada MAC com suporte para transmissão *broadcast/multicast* em adição a transmissão *unicast*, é esperado também o suporte multicanal ou equipamentos com vários rádios. Além de especificações da frequência de operações na banda de rádio ISM (*Industrial, Scientific, and Medical*) onde funcionam os demais padrões IEEE 802.11 a/b/g/n, no qual não há necessidade de licença de operação.

As redes *mesh* podem ser implementadas em dois modos básicos: infra-estruturado e clientes *mesh* (sem infra-estrutura) [4]. O primeiro é classificado como ESS (descrito no Capítulo 2), onde os pontos de acessos são interconectados através de conexão *wireless* e permitem o conhecimento automático da topologia e configuração dinâmica da rede.

As redes *wireless* possuem várias arquiteturas, dependendo do cenário e do objetivo das redes sem fio, como o simples acesso a internet através de dispositivos móveis, proporcionado por um *access point - AP*, ou a coleta, armazenamento e processamento de dados em uma rede de sensores, por exemplo.

Na Figura 5.12 será mostrado as principais arquiteturas de redes *wireless* [37], no item (a) é mostrada uma rede *wireless* infra-estruturada com utilização de um AP; no item (b) é apresentada uma arquitetura *ad-hoc*, onde é formada uma topologia dinâmica sem utilização de AP; no item (c) é apresentada uma arquitetura mista, onde a mesma utiliza-se dos benefícios tanto da rede infra-estruturada quanto das redes *ad-hoc*, no pontilhado é mostrada a comunicação *ad-hoc* e na linha contínua é apresentada a comunicação via AP; e no item (d) é apresentada à arquitetura *mesh*.

A arquitetura da rede *mesh* apresenta os clientes nodos denominados de *mesh point (MP)*, onde os mesmos utilizam os serviços oferecidos pela rede e/ou funcionam como roteadores para outros clientes da rede, sendo outro MP ou uma estação (STA). STAs são clientes que utilizam os serviços da rede e que não possuem características de roteamento.

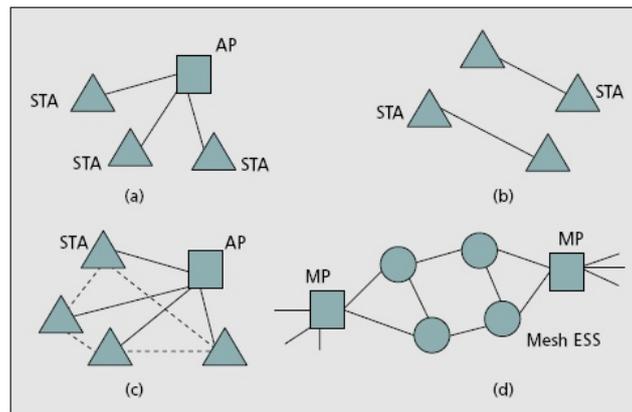


Figura 5.12: Redes sem fio (IEEE 802.11). (a) infra-estruturada; (b) *ad-hoc*; (c) modo misto; (d) rede *mesh*.

Estas redes apresentam também na sua arquitetura os seguintes: *Mesh Portal* (MPP), *Mesh Access Point* (MAP), onde o MPP funciona como *bridge/gateway* entre *Mesh Wireless Local Area Networks* (MWLANs) e outras redes no sistema de distribuição (DS); e o MAP funciona como *access point* de redes *mesh*. Na Figura 5.13 são apresentados os componentes da arquitetura das redes *mesh* LAN [3, 47].

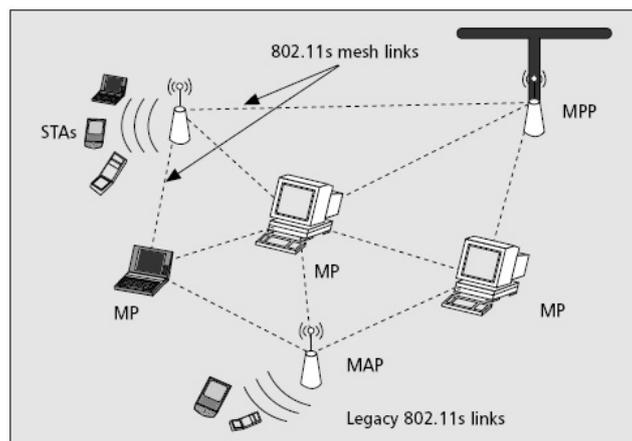


Figura 5.13: Arquitetura de redes *mesh* padrão IEEE 802.11s

A seguir na Figura 5.14 é mostrada a topologia de uma rede *mesh*, no item (a) é apresentada uma topologia típica onde alguns MP são conectados ao DS *wired*, provendo a conexão dos demais nodos à internet, portanto estes nodos são classificados como Portal *mesh*, neste exemplo as estações são conectadas como nodos folhas; já no item (b) é mostrado uma rede autônoma, onde os MPs e as STAs são conectadas entre si, contudo nenhuma apresenta conexão com a internet através de um DS *wired*.

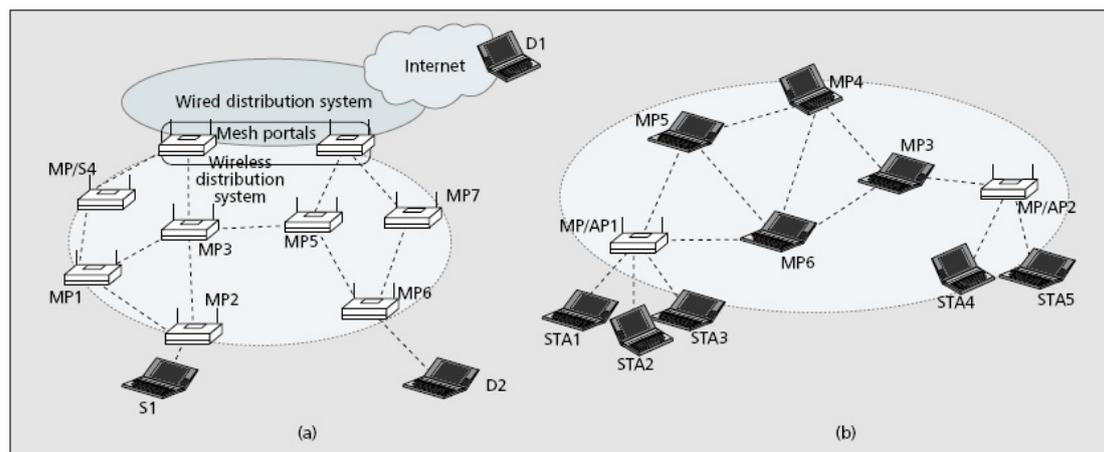


Figura 5.14: Topologia de rede *mesh* WLAN.

5.4.2 Padrão - 802.15.5

O padrão IEEE 802.15.4 especifica as funções da camada física e da subcamada MAC [48]. O grupo IEEE 802.15.5 criado em maio de 2004 está trabalhando atualmente para fornecer um padrão de estrutura de arquitetura para topologia *wireless* com as seguintes características: interoperabilidade, estabilidade e escalabilidade para dispositivos WPANs *Mesh* [3]. A seguir será descrita a arquitetura *mesh* baseada em [49], onde se trata apenas da característica de baixa taxa de transferência (*low rate* - LR).

A proposta do padrão é baseada em uma *árvore mesh*, onde a *árvore* trata-se de uma estrutura útil para o roteamento. A *árvore* robusta adaptativa (*Adaptive Robust Tree* - ART) trata-se de uma arquitetura onde os endereços lógicos são adaptados durante o procedimento de formação da *árvore*, para que com isso possa refletir a topologia real da rede e também que a *árvore* está livre de possuir um único ponto de falha (*single point of failures* - SPFs).

Na ART cada nodo possui uma tabela (*ART Table* - ARTT) para caminhar nos seus ramos, cada ramo é associado a um ou mais blocos de endereços consecutivos.

Funcionalmente existem três fases na ART: a fase de inicialização (ou configuração), fase de operação e a fase de recuperação.

Durante a fase de inicialização os nodos entram na rede e formam a *árvore* ART, posteriormente é iniciada a fase de operação; Na fase de operação as comunicações normais são iniciadas, é permitida também a união de novos nós na rede, caso o número de nodos da rede seja alterado de forma significativa, a mesma pode precisar ser reconfigurada. Caso a *árvore* seja quebrada a fase de recuperação é iniciada, esta fase se diferencia das demais, pois é realizada apenas na parte afetada da *árvore*.

A formação de uma *árvore* ART ocorre em dois estágios: atribuição do endereço e da associação (formação dos *links*).

No estágio de associação a partir da raiz os nodos se juntam a rede formando uma *árvore*, porém ainda não é uma *árvore* ART, devido a não terem sido atribuídos os endereços lógicos dos nodos. Após a *árvore* alcançar o fundo, ou seja, todos os nodos do ultimo nível da *árvore* são folhas e não possuem nenhum filho. Um procedimento de baixo para cima é realizado para calcular o número de nodos em cada ramo, conforma mostrado na figura 5.15.

A Figura 5.15 mostra o cálculo do número de nodos em cada ramo, este cálculo é realizado de

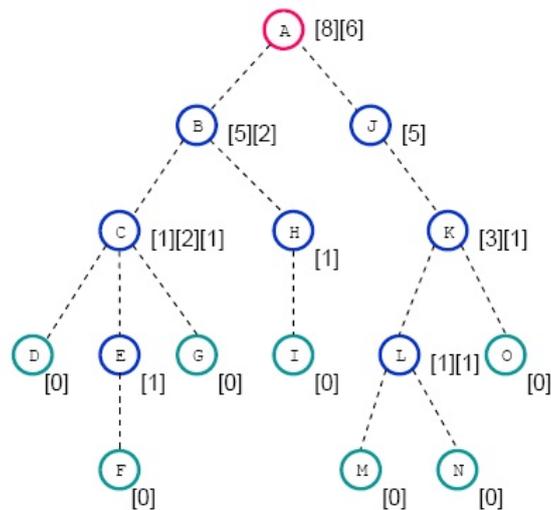


Figura 5.15: Cálculo do número de nodos em cada ramo.

baixo para cima, onde os números apresentados ao lado de cada nodo representam o número de filhos, ou seja, o número de nodos no ramo formado por cada nodo como, por exemplo, o nodo **C** apresenta um ramo a sua esquerda com apenas um filho, um ramo no centro com dois filhos e um ramo a direita com um filho.

Quando os números de nodos nos ramos são atribuídos de baixo para cima cada nodo pode indicar também um endereço desejado, o resultado final da atribuição dos endereços é que cada nodo possui uma árvore ART construída, por exemplo, o nodo **L** possui uma árvore ART, formado através dos ramos com os nodos **M** e **N**. A árvore ART é construída de forma que o reparo e a recuperação da árvore possam ser realizados sem a mudança de nenhum endereço atribuído.

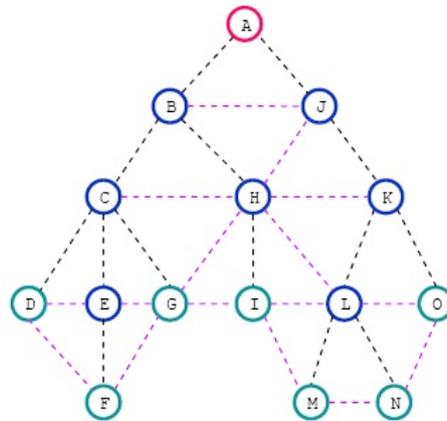
A árvore robusta adaptativa *mesh* (*Meshed Adaptive Robust Tree* - MART) pode ser formada no alto de uma árvore ART, a Figura 5.16 mostra a árvore ART original conectada através de linhas pretas, às linhas roxas são adicionadas de forma que a árvore possa a ser vista como uma rede *mesh*, porém ainda os nodos (individualmente) possuem a visão de uma árvore ART. Os nodos ligados através das linhas roxas adicionam em sua tabela de roteamento (ARTT) uma entrada referente à ligação de cada vizinho, ou seja, uma entrada para cada enlace roxo descrito na Figura 5.16.

Com a criação de uma árvore *mesh* tem-se as vantagens que um pacote percorre um caminho mais curto e são removidos os SPFs, pois caso um nodo entre em *crash* o pacote pode ser transmitido através de outro caminho.

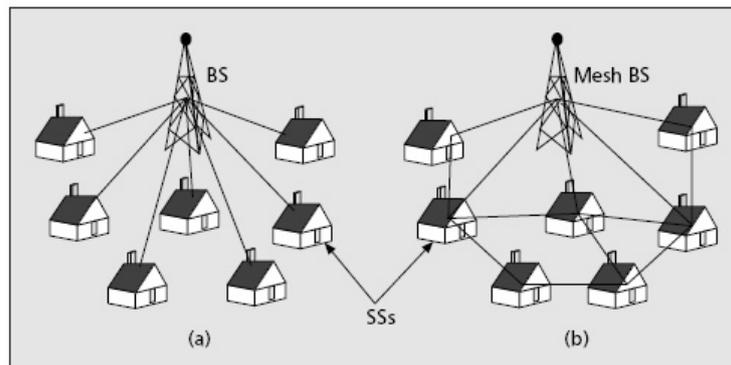
5.4.3 Padrão - 802.16a

O IEEE 802.16 define a camada física (PHY) e a sub-camada *Medium Access Control* - MAC para redes sem fio do tipo MAN (*Metropolitan Area Networks*). O padrão foi projetado para operar nas frequências licenciadas de 10-66 Ghz, com alcance de 5 Km, similar a estações bases (*Base Estations* - BS) de celular.

O padrão IEEE 802.16a incorpora o “modo *mesh*”, com adição do PMP (*Point-to-Multipoint*). Este novo padrão funciona em frequências licenciadas e não licenciadas de 2-11 Ghz, e a comunicação funciona com alcance máximo de 50Km. Uma diferença importante entre a modalidade

Figura 5.16: *Mesh ART*.

PMP e a modalidade *mesh*, está no fato da modalidade *mesh* permitir a comunicação *multi-hop*, ou seja, entre os próprios nodos, sem a necessidade da BS, porém na modalidade PMP as estações precisam da BS para se comunicar, conforme mostrado na Figura 5.17.

Figura 5.17: Ilustração do padrão IEEE 802.16a. (a) modo *point-to-multipoint* (b) modo *mesh*

O padrão IEEE 802.16 possui uma administração centralizada onde os dados de uma estação a outra sempre passam por uma estação base (BS), porém no modo *mesh* um outro fator passa a ser mais importante do que a centralização do tráfego dos dados, a linha de visão (*line-of-sight* - LOS) dos nodos da rede, porque o sistema pode tolerar uma quantidade limitada de interferência [50], realizando um salto entre as faixas de canal estabelecido dentro da frequência, pois a tecnologia funciona com multi-canal de operação.

Capítulo 6

Trabalhos Relacionados

Neste Capítulo são apresentados os trabalhos e pesquisas realizadas quanto ao desempenho dos protocolos de roteamentos em redes *wireless ad-hoc e mesh*, assim como, os trabalhos realizados por diversos grupos de pesquisas que buscam a implementação e validação destas redes. Entre os diversos projetos pode-se citar: VMesh [51], MeshNet [52, 53], RoofNet [47] e *Self-Organizing Neighborhood Wireless Mesh Networks* desenvolvido pelo Microsoft Research [54].

O trabalho [1] apresenta algumas características e o funcionamento dos principais protocolos de roteamento: *Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing - AODV*, *Dynamic Source Routing - DSR*, *Destination-Sequenced Distance-Vector - DSDV* e *Temporally Ordered Routing Algorithm - TORA*, assim como, algumas métricas utilizadas para análise de protocolos e avaliação de desempenho dos mesmos.

Em [7] é apresentada uma avaliação de desempenho dos protocolos de roteamento em redes de sensores sem fio que são um tipo especial de redes *ad-hoc*, no qual apresenta dentre os protocolos estudados um protocolo pró-ativo (DSDV) com melhor desempenho.

Em [55] é mostrada uma avaliação de desempenho de dois protocolos de roteamento, o *Dynamic Source Routing - DSR* e *Destination-Sequenced Distance-Vector - DSDV*, entretanto essa avaliação de desempenho foi realizada em função de duas técnicas de diferenciação de serviços nos protocolos, onde essas técnicas são utilizadas para possibilitar que os protocolos de roteamento utilizassem informações mais recente quanto possível, da rede em questão.

Em [22] é realizado um estudo sobre a eficiência de protocolos de roteamento em redes *wireless*. O protocolo WRP quando comparado com os protocolos *Bellman-Ford Algorithm - DBF*, *Diffusing Update Algorithm - DUAL* [56] e *Ideal Link-state Algorithm - ILS* apresentou uma eficiência de 50% em comparação ao protocolo DUAL, mostrando-se uma excelente alternativa para o roteamento em redes *wireless*.

Broch *et. al.* [57] realizaram uma comparação de desempenho entre quatro protocolos de roteamento: DSDV, AODV, DSR e o TORA, onde são analisados três métricas: *packet delivery ratio*, *routing overhead* e *path optimality*. Este estudo mostrou que cada protocolo apresenta suas vantagens e desvantagens dependendo do cenário e dos *hardwares* utilizados.

O VMesh é um projeto desenvolvido na Universidade Thessaly na Grécia, e tem como objetivo implantar uma rede *Mesh* de baixo custo na cidade de Volos. A rede é formado por roteadores que funcionam no modo *ad-hoc* e por elementos estacionários e móveis, tendo como objetivo fornecer a conexão de um ou mais dispositivos ao restante da rede. O protocolo de roteamento utilizado nos roteadores é o protocolo *Optimized Link State Routing Protocol - OLSR* [51].

O projeto MeshNet é desenvolvido pela Universidade da Califórnia com o experimento Santa Barbara Mesh. Esse projeto trata de uma rede *wireless* implantada nos cinco andares do prédio da

Engenharia no campus da Universidade de Santa Bárbara, na Califórnia. Projeto composto por 25 nodos equipados com rádios 802.11a/b/g, buscando o funcionamento com *QoS* na comunicação *multi-hop*. O protocolo de roteamento utilizado pelos roteadores do projeto é o *Ad-hoc On-demand Distance Vector - AODV*[52].

Dentre estes grupos e projeto descritos temos o MIT (Instituto de Tecnologia de Massachusetts) e o Microsoft Research que apresentam também estudos que buscam a viabilidade da tecnologia *wireless mesh*, através dos dois projetos descritos a seguir.

6.1 RoofNet

O Roofnet é um projeto desenvolvido na cidade de Cambridge, Massachusetts pelo Laboratório de Ciência da Computação e Inteligência Artificial (CSAIL) do MIT.

Trata-se de uma área urbana de 4 quilômetros de alta densidade populacional, próxima a Universidade, onde foram espalhados 37 nodos com as seguintes características:

- *Hardware* padronizado e fornecido pelo MIT;
- PCs com sistema operacional Linux;
- Placa *wireless* padrão 802.11b;
- Antena omnidirecional, com um feixe de cobertura de 20°, instalado no topo dos edifícios participantes;
- Rádios funcionando com uma potência de 200mW, todos operando no mesmo canal 802.11b;
- Os PCs dos voluntários são ligados a esses nodos por meio de cabeamento *Ethernet*.

O protocolo de roteamento utilizado no Roofnet é um protocolo baseado no DSR (*Dynamic Source Routing*), denominado de Srcr. A diferença entre estes protocolos é que no DSR a métrica utilizada é o número de saltos e o protocolo Srcr utiliza uma métrica denominada *Estimated Transmission Time* (ETT), derivada da *Estimated Transmission Count* (ETX) [58], no qual leva em consideração também a taxa de perda dos pacotes na transmissão entre os nodos.

Com isso, este protocolo busca a rota com maior vazão entre os nodos da rede Roofnet, ou seja, aquela que possua o menor valor de ETT. No projeto a rede apresentou uma vazão (*throughput*) em média de 627Kbps [47].

De acordo com os estudos e experimentos realizados pelo grupo do MIT constatou-se que a arquitetura *mesh* é uma solução viável e que quando comparada a uma rede de um único salto, ou a uma rede de vários saltos, a rede Roofnet aumenta a conectividade e a vazão da rede.

6.2 Microsoft Research

A Microsoft possui um grupo de pesquisa destinado à tecnologia *wireless mesh*. Através de um projeto denominado de *Self-Organizing Neighborhood Wireless Mesh Networks*, este grupo tem como objetivo a viabilização deste tipo de rede a médio e longo prazo [54].

Trata-se de um projeto com uma extensão menor do que o realizado pelo Roofnet, os cenários utilizados foram uma das sedes da empresa e em apartamentos de um condomínio próximo a sede da empresa. O *hardware* utilizado é o próprio PC do usuário com um driver para o sistema operacional Windows que cria uma camada virtual entre as camadas de rede e a camada de enlace.

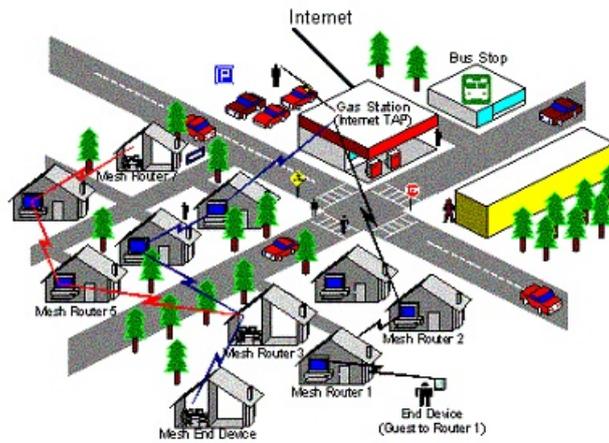


Figura 6.1: Projeto Microsoft Research.

O grupo de pesquisa também desenvolve um *framework* de gerenciamento de falhas para redes *mesh*. Partindo do princípio de detecção, isolamento e diagnóstico de falhas, esta análise é realizada através da simulação dos eventos, para que possa ser permitido o diagnóstico de problemas e das condições do tráfego.

A Microsoft verificou a viabilidade das redes *mesh* e disponibiliza em [54] a sua implementação da rede *mesh* gratuitamente, no qual pode ser utilizada pelo meio acadêmico, através da ferramenta: *Microsoft Mesh Toolkit*.

A Figura 6.1 mostra o *layout* de implementação do projeto realizado pelo grupo Microsoft Research.

Conforme apresentado neste Capítulo 6, existem diversos grupos buscando inicialmente a implementação desta tecnologia, dentre estes grupos temos aqueles que utilizam como protocolos de roteamento os mesmo utilizados pelas MANETs, visto que, as arquiteturas são semelhantes.

Existem outros projetos que de forma semelhante ao Roofnet e Microsoft Research, também utilizam protocolos de roteamento diferenciado das MANETs. Buscando não só o funcionamento correto das redes mas também proporcionar *QoS* a redes, como, por exemplo, alto desempenho e tolerância a falhas.

Capítulo 7

Avaliação de Desempenho

Este capítulo tem como objetivo mostrar os métodos utilizados para realizar uma avaliação de desempenho em diversos tipos de sistemas. Para o trabalho em questão a avaliação de desempenho busca formar um ranking dos protocolos de roteamento utilizados pelas redes *ad-hoc* e pelas redes *mesh*. Os protocolos utilizados no estudo são: o AODV, DSDV, DSR, TORA e FSR (descritos no Capítulo 4).

Como o objetivo do trabalho é a análise dos protocolos de roteamento e esta análise é realizada através da vazão da rede com os cálculos de média, intervalo de confiança e desvio padrão desta vazão com os dados obtidos (denominados de amostras) através de diversas simulações descritas no Capítulo 8.

Para a realização da Análise de Desempenho de Sistemas (ADS) dos protocolos foram utilizadas as equações descritas a seguir:

- A média aritmética é a medida que mostra o valor central das amostras obtida através da equação:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (7.1)$$

- Variância é uma medida de dispersão estatística que indica o afastamento dos elementos de uma amostra, em relação a média aritmética, esta medida é obtida através da equação:

$$s^2(X) = \frac{\sum (x_i - \bar{X})^2}{n - 1} \quad (7.2)$$

- Desvio padrão é a medida mais comum de dispersão estatística utilizada quando a variância não pode ser utilizada, por exemplo, uma medida de dispersão não negativa ou com unidades que não possuem significado físico, esta medida pode ser obtida através da equação:

$$s(x) = \sqrt{s^2(x)} \quad (7.3)$$

- Intervalo de confiança [59] (ou IC) trata-se de uma faixa de valores estimados, cuja probabilidade de conter o verdadeiro valor do parâmetro é igual ao nível de confiança, sendo que este intervalo é calculado a partir de um conjunto de valores das amostras da população.

A largura do intervalo de confiança mostra quanta incerteza existe sobre o parâmetro desconhecido. Um intervalo muito grande pode indicar que mais dados devem ser coletados antes que algo em definitivo seja dito sobre o parâmetro.

Intervalos de confiança são mais informativos do que resultados simples de testes de hipóteses (H_0), onde se decide rejeitar ou não rejeitar, desde que seja fornecido um intervalo de valores plausíveis para o parâmetro desconhecido.

Se amostras independentes são tiradas repetidamente de uma mesma população, e um intervalo de confiança é calculado para cada amostra, então um percentual (nível de confiança) dos intervalos incluirá o parâmetro desconhecido da população. Intervalos de confiança são calculados de forma que esta percentagem seja de 95 %, porém, podem produzir intervalos de confiança de 90 %, 99 %, 99.9 % para os parâmetros desconhecidos.

O nível de confiança é o valor probabilístico $1-\alpha$ (chamado de coeficiente de confiança) associado com um intervalo de confiança. É geralmente expresso por uma porcentagem. Por exemplo, se $\alpha = 0,05 = 5 \%$, então o nível de confiança $= (1-0,05) = 0,95$, que é um nível de confiança de 95 %. Ou seja, o IC trata-se de um intervalo estimado, determinado pelo coeficiente obtido através da equação:

$$IC = \bar{X} \pm z \left(\frac{s}{\sqrt{n}} \right) \quad (7.4)$$

Com este capítulo podemos entender as medidas e equações estatísticas utilizadas para obtenção dos resultados demonstrados na Seção 8.3.

Capítulo 8

Estudo de Caso

Este Capítulo discute a estratégia e a ferramenta utilizada para a avaliação de desempenho dos protocolos de roteamento, considerando as características de dois cenários propostos. É realizada também uma análise dos resultados obtidos nas simulações.

8.1 Network Simulator (ns-2)

A ferramenta selecionada para simulação dos cenários e avaliação de desempenho dos protocolos foi o *Network Simulator (ns-2)* [60], versão 2.27 por possuir suporte ao protocolo híbrido FSR. O *ns-2* é um simulador de redes de computadores, com maleabilidade em relação aos protocolos de rede, suportando simulações de protocolos em larga escala, sendo usado também como um emulador de rede podendo fazer interação com uma rede real.

O *ns-2* possui um visualizador gráfico para animações da simulação (NAM - *Network Animation*), temporizadores, escalonadores e prevê suporte aos protocolos TCP e UDP. Contendo também modelos para cálculos numéricos, ferramentas de plotagem (o *xgraph*) e vários geradores de tráfego. Além de módulos como o interpretador para tcl (*tcl/tk*) que é a interface com o usuário, o tcl com orientação ao objeto (*Otcl*), a implementação de classes para Tcl (*tclcl*), classes do simulador (*ns-2*), bibliotecas (*cweb* e *SGB*), geradores de topologia (*bt-itm*, *gt-itm*, *sgb2-ns*) e ferramenta para compressão de arquivos [60].

O *ns-2* traz consigo um código aberto onde é permitida a inclusão de novos módulos ou a alteração dos que já existem, além de ser gratuito, pode ser utilizado em diferentes plataformas como: Unix, Linux, SunOS, FreeBSD, Solaris e outros [7].

8.2 Cenários de simulação

Nas simulações utilizou-se uma topologia e dois cenários, onde estes cenários foram diferenciados pelo número de nodos e quantidade de tráfego gerado pelos nodos fontes, conforme demonstrados pelas Figuras 8.1 e 8.2.

A Figura 8.1 representa a formação da topologia *mesh* com 50 nodos, onde 49 nodos da rede são nodos *hosts* e 1 nodo representa o nodo servidor; enquanto que a Figura 8.2 representa a formação da topologia com 51 nodos, onde 49 nodos da rede são nodos *hosts* e 2 nodos representam os nodos servidores, conforme apresentado nas respectivas figuras.

Os nodos foram dispostos em um plano cartesiano (x, y) com uma distância de 50 metros uns dos outros, onde o primeiro está localizado na posição $(50,50)$ tendo $ID = 0$ e posteriormnte

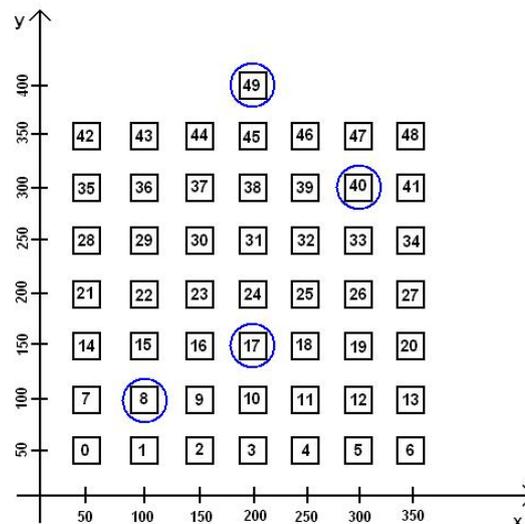


Figura 8.1: Disposição dos nodos na topologia malha com um nodo *sink* representado no eixo cartesiano (x,y) .

são incrementados da esquerda para direita e de baixo para cima até a formação completa da topologia.

No primeiro cenário representado pela Figura 8.1 o nodo *sink* (servidor ID = 49) está localizado na posição $(200,400)$ e apresenta três nodos como fontes de tráfego: o nodo 08, o 17 e o 40 (circulados na Figura 8.1). Estes nodos foram escolhidos de forma a representar um nodo distante do servidor, um nodo perto do servidor e um nodo com uma distância intermediária.

Para o segundo cenário representado pela Figura 8.2 os nodos *sinks* (servidores ID = 49 e ID = 50) estão localizados nas posições $(200,400)$ e $(400,200)$, e apresentam seis nodos como fontes de tráfego: o nodo 08, o 17 e o 40, comunicando-se com o servidor 49; e os nodos 12, 23 e 36 comunicando-se com o servidor 50.

Na simulação utilizou-se como modelo de propagação o modelo *Shadowing*. Este modelo de propagação apresenta como variáveis para seu funcionamento o expoente de perdas (β), o desvio (s em dB), a distância e o gerador de número aleatório (RNG - *Random Number Generator*) que mostra se os nós são de boa qualidade [60]. Neste modelo a variável que indica o nível de obstrução de sinal é chamada de expoente de perdas (β) e possui valores entre 1 e 6 [60]. Para ambientes externos (*outdoor*), esta variável apresenta os valores entre 2 e 5, e para área urbana (β) este valor fica entre 2,7 e 5. Portanto estipulou-se o valor 3 para esta variável (caracterizando um ambiente de área urbana). O parâmetro desvio (s) varia entre 3 e 12 [60]. Para ambientes obstruídos o valor desta variável é 6,8 na simulação utilizou-se o valor 3 para esta variável pois este valor representa um ambiente de fábrica.

As características da topologia proposta incluem: Tráfego CBR (*constant bit rate*); Protocolo UDP (*User Datagram Protocol*); Protocolo da camada MAC (*Medium Access Control*) o 802.11; Frequência de rádio dos dispositivos 2.4Ghz; e largura de banda de 11Mbps. O protocolo UDP foi escolhido como protocolo da camada de transporte porque o TCP não apresenta bons resultados para rede *multi-hop*, quando o número de saltos é maior ou igual a 4 [4]. As simulações foram realizadas com tempo de 300 segundos e obteve-se como saída das simulações vazão da rede para os cenários testados com os protocolos de roteamento AODV, DSDV, DSR e o FSR.

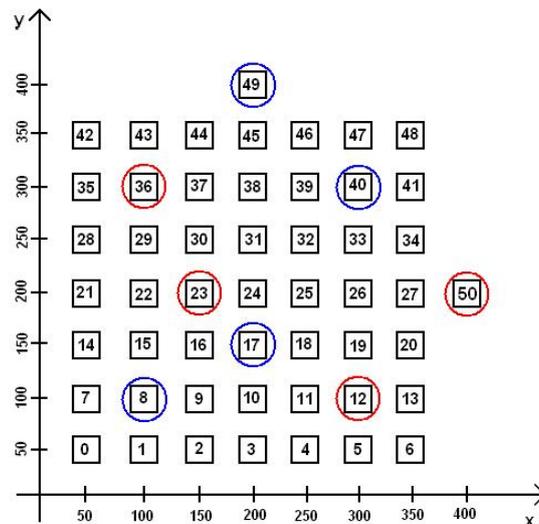


Figura 8.2: Disposição dos nodos na topologia malha contendo dois nodos *sinks* representados no eixo cartesiano (x,y).

O protocolo de roteamento TORA não apresentou vazão para a topologia de rede criada, devido ao mesmo (como mostrado no Capítulo 4) ser protocolo para redes móveis e dinâmicas, características estas não apresentadas na topologia estudada, pois apresentam seus nodos estáticos distribuídos na rede.

A Tabela 8.1 lista os parâmetros de configurações para avaliação de desempenho utilizado nas simulações, a primeira coluna representa os Protocolos de Roteamento (PR) e a segunda coluna a Largura de Banda (LB) em Mbps.

Tabela 8.1: Análise da vazão com a topologia para 50 nodos

PR	LB	1 cenário	2 cenário	Modelo Shadowing
AODV	11	03 fontes 01 <i>sink</i>	06 fontes 02 <i>sinks</i>	$\beta = 3,0$ e (s) = 3,0
DSDV	11	03 fontes 01 <i>sink</i>	06 fontes 02 <i>sinks</i>	$\beta = 3,0$ e (s) = 3,0
FSR	11	03 fontes 01 <i>sink</i>	06 fontes 02 <i>sinks</i>	$\beta = 3,0$ e (s) = 3,0
DSR	11	03 fontes 01 <i>sink</i>	06 fontes 02 <i>sinks</i>	$\beta = 3,0$ e (s) = 3,0

8.3 Resultados Obtidos

Esta secção tem por objetivo apresentar os resultados obtidos através da simulação e monitoração da rede apresentada no Capítulo 8, buscando com isso criar uma hierarquia dos protocolos de roteamento com maior desempenho dentre os protocolos utilizados pelas redes *wireless*. Os protocolos utilizados no estudo são: o AODV, DSDV, DSR e FSR (descritos no Capítulo 4).

Para a realização da análise do desempenho utilizou-se a técnica de simulação com os cenários descritos no Capítulo 8. Com a vazão obtida após as simulações calculou-se a média aritmética, calculada através da Equação 7.1; em seguida calculou-se o intervalo de confiança, através da Equação 7.4; e, posteriormente, calculou-se o desvio padrão, através das Equações 7.2 e 7.3.

A vazão foi calculada em função do tempo, ou seja, para cada 0,5 segundos tem-se uma amostra da vazão. Como as simulações foram executadas com tempo igual a 300 segundos, então, temos 600 amostras (n) da vazão da rede.

Conforme descrito na Secção 8.2 foi utilizada uma topologia em malha e dois cenários, portanto com a vazão obtida pela rede e após a aplicação da mesma nas Equações 7.1, 7.3 e 7.4 obteve-se os seguintes resultados mostrados nas Tabelas 8.2 e 8.3.

Tabela 8.2: Análise da vazão com a topologia para 50 nodos

PR	AODV	DSDV	FSR	DSR
\bar{X}	0,003054	0,002435	0,000962	0,007459
s(x)	0,010749	0,004669	0,003409	0,021105
IC-	0,002193	0,002061	0,000690	0,005769
IC+	0,003915	0,002809	0,001236	0,009150

Tabela 8.3: Análise da vazão com a topologia para 51 nodos

PR	AODV	DSDV	FSR	DSR
\bar{X}	0,001527	0,000411	0,000442	0,001501
s(x)	0,005552	0,002134	0,002695	0,007883
IC-	0,001082	0,000240	0,000226	0,000870
IC+	0,001972	0,000582	0,000657	0,002132

Inicialmente com dados obtidos através das médias dos protocolos verifica-se que o protocolo DSR um apresenta melhor desempenho no primeiro cenário e no segundo cenário equivalente ao protocolo AODV. Porém, faz-se necessário mais análises a serem realizadas a partir dos gráficos representados através das Figuras 8.3 e 8.4:

1. Para os cenários estudados inicialmente o protocolo com maior desempenho é o DSR, porém verifica-se que, no segundo cenário seu desempenho fica um pouco atrás do protocolo AODV, contudo possui um desvio padrão superior aos demais, o que caracteriza a instabilidade da rede, ora a vazão pode ser alta e ora a vazão pode estar até mesmo nula.
2. Para análises da média aritmética dos protocolos no primeiro cenário os protocolos apresentaram o seguintes desempenhos: $DSR > AODV > DSDV > FSR$; enquanto que para o segundo cenário o desempenho apresentado dentre os protocolos foi: $AODV \geq DSR > FSR > DSDV$.
3. Segundo [59], a partir dos intervalos de confiança e da média aritmética pode-se realizar a seguinte análise:
 - (a) Análise do primeiro cenário:
 - i. Como a média do protocolo AODV (referente ao primeiro cenário) não pertence ao intervalo de confiança do protocolo DSR ($\bar{X}_{AODV} \notin [IC-, IC+]_{DSR}$) e a média do protocolo DSR não pertence ao intervalo de confiança do protocolo AODV

($\bar{X}_{DSR} \notin [IC-, IC+]_{AODV}$), isso demonstra que os protocolos são significativamente diferentes, caracterizando que somente a análise da média é necessária para hierarquia destes protocolos.

- ii. Como a média do protocolo AODV não pertence ao intervalo de confiança do protocolo DSDV ($\bar{X}_{AODV} \notin [IC-, IC+]_{DSDV}$) e a média do protocolo DSDV pertence ao intervalo de confiança no protocolo AODV ($\bar{X}_{DSDV} \in [IC-, IC+]_{AODV}$), isso demonstra que os protocolos são diferentes entre si, sendo necessário somente a análise da média entre estes protocolos.
- iii. Quanto ao protocolo FSR, o mesmo apresenta sua média fora dos intervalos de confiança dos demais protocolos simulados (AODV, DSDV e DSR), ou seja, $\bar{X}_{FSR} \notin [IC-, IC+]_{AODV}$, $\bar{X}_{FSR} \notin [IC-, IC+]_{DSDV}$ e $\bar{X}_{FSR} \notin [IC-, IC+]_{DSR}$, representando que somente a análise das médias é necessária para a hierarquização quanto ao desempenho destes protocolos. Resultando na seguinte hierarquia quanto ao desempenho dos protocolos: $DSR > AODV > DSDV > FSR$.

(b) Análise do segundo cenário:

- i. Para o segundo cenário a média aritmética do protocolo AODV pertence ao intervalo de confiança do protocolo DSR, assim como, a média do protocolo DSR pertence ao intervalo de confiança do protocolo AODV. Isso demonstra que os protocolos são semelhantes entre si, sendo necessária uma segunda análise, ou seja, de uma análise de dispersão das amostras, calculadas através das Equações 7.2 e 7.3. Verifica-se dessa forma que o protocolo AODV possui um melhor desempenho devido seu ao desvio padrão ser menor do que o protocolo DSR.
- ii. O protocolo AODV apresenta maior média (dos demais protocolos) e não pertence aos intervalos de confiança dos protocolos DSDV e FSR ($\bar{X}_{AODV} \notin [IC-, IC+]_{DSDV}$ e $\bar{X}_{AODV} \notin [IC-, IC+]_{FSR}$). Contudo, quanto aos protocolos DSDV e o FSR ambos apresentam as seguintes características: $\bar{X}_{FSR} \in [IC-, IC+]_{DSDV}$ e o $\bar{X}_{DSDV} \in [IC-, IC+]_{FSR}$, demonstrando que os protocolos são significativamente semelhantes, necessitando a análise dos dados de dispersão calculados pelas equações 7.2 e 7.3. Como o protocolo FSR apresenta maior média e menor desvio padrão para o segundo cenário os protocolos com maior desempenho são: $DSR > AODV > FSR > DSDV$.

Conforme verificado nas análises o protocolo DSR apresenta um excelente desempenho em ambos os cenários, porém apresenta também um elevado desvio padrão caracterizando grande instabilidade da rede, ora a mesma pode estar com excelente taxas de tráfego, ora ela pode estar até mesmo nula. O segundo protocolo com maior desempenho nas simulações é o protocolo AODV, que trata-se também de um protocolo reativo, caracterizando a utilização da largura de banda de forma eficiente da rede, utilizando-a somente quando realmente necessário.

Apesar do grande desvio padrão do protocolo DSR o seu intervalo de confiança (IC-) demonstra o menor valor que a vazão da rede pode alcançar. Para o primeiro cenário este valor ainda é maior que a média dos demais protocolos demonstrando ser um excelente protocolo de roteamento. Para o segundo cenário pode-se observar um valor ainda maior do que as médias dos demais com exceção ao protocolo AODV, no qual sua média é maior que o intervalo de confiança inferior do protocolo DSR (IC-). Porém como demonstrado anteriormente estes protocolos são semelhantes entre si.

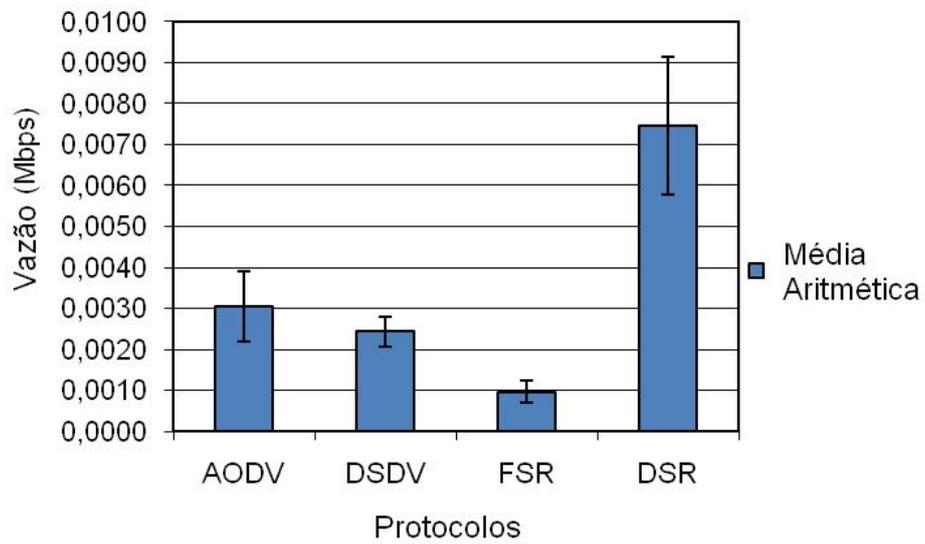


Figura 8.3: Gráfico obtido com as simulações para 50 nodos na rede.

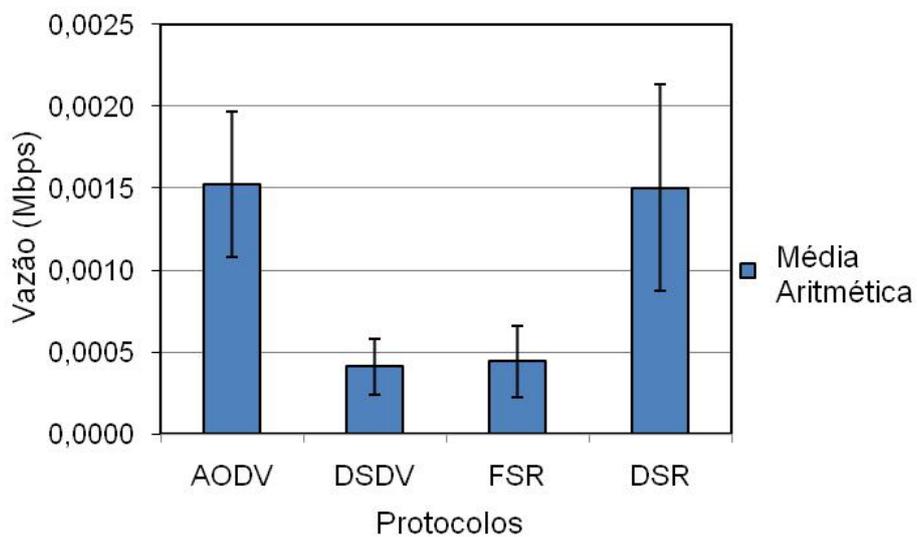


Figura 8.4: Gráfico obtido com as simulações para 51 nodos na rede.

Capítulo 9

Conclusões e Trabalhos Futuros

Apesar da grande evolução da tecnologia *wireless*, esta tecnologia ainda carece de mecanismos ou soluções que viabilizem a transferência de dados multimídia que demandam altas taxas de transferência e alta largura de banda, pois, conforme descrito na Secção 8.3, em todos os resultados das simulações da rede a vazão foi inferior a 1Mbps.

A partir dessas necessidades apresentadas pelas redes *wireless* grupos de pesquisas vem trabalhando no desenvolvimento de uma nova geração das redes *wireless*, as redes “*wireless mesh network*” que buscam proporcionar os serviços das redes *wireless* com maior qualidade e eficiência não dependente das redes *wired* [4].

Conforme a análise realizada pode-se concluir que os protocolos estudados apresentam vantagens e desvantagens, dependendo do cenário, do número de nodos e da quantidade de tráfego gerado na rede, portanto o protocolo que apresentou maior desempenho foi o DSR, devido principalmente a sua característica de funcionamento sob demanda, o que não degrada a largura de banda com excessivas mensagens de controle.

Com a adição da métrica ETX ao protocolo DSR procura-se ter um maior desempenho da rede, proporcionando aos usuários qualidade dos serviços oferecidos através do *backbone* central demonstrado no Capítulo 8.

Portanto, verificamos que além dos protocolos de roteamento são necessárias técnicas e equipamentos que possam suprir, por exemplo, as interferências que as redes *wireless* possuem no meio ambiente.

Como trabalho futuro temos a pesquisa de outras técnicas que possam possibilitar uma maior vazão e escalabilidades das redes *wireless*, proporcionando uma maior estabilidade, velocidade e segurança para este serviço em grande ascensão.

Referências Bibliográficas

- [1] D. A. Maltz, “On-demand routing in multi-hop wireless mobile ad hoc networks,” May, School of Computer Science Carnegie Mellon University Pittsburgh, PA 15213, 2001.
- [2] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, “A survey on sensor networks,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 1, no. 8, pp. 102–114, August 2002, day 22 July of 2006. [Online]. Available: <http://w5.cs.uni-sb.de/teaching/ss06/IE/Literatur/SurveySensorNets.pdf>
- [3] M. J. Lee, J. Zheng, Y.-B. Ko, and D. M. Sherestha, “Emerging standards for wireless mesh technology,” *Wireless Communications, IEEE*, vol. 13, pp. 56–63, April 2006.
- [4] I. F. Akyildiz, X. Wang, and W. Wang, “Wireless mesh networks: a survey,” *Computer Networks and ISDN Systems*, vol. 47, no. 4, pp. 445–487, March 2005.
- [5] M. Pidd, *Computer Simulation in Management Science*, 3rd ed., I. John Wiley & Sons, Ed. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, Inc., 1992.
- [6] A. S. Tanenbaum, *Redes de Computadores*, 3rd ed., Campus, Ed. Campus, 1997.
- [7] M. M. Farias, A. G. de Souza, D. S. Wanzeller, and A. J. F. Cardoso, “Análise de queimadas na região amazônica através de redes sensoriais,” in *Simpósio de Informática da Região Centro do Rio Grande do Sul, IV*, Ed., November 2005.
- [8] C.-C. Yang and L.-P. Tseng, “Fisheye zone routing protocol for mobile ad hoc networks,” *Consumer Communications and Networking Conference, 2005. CCNC. 2005 Second IEEE*, pp. 1–6, Jan 2005.
- [9] T. W. G. for 802 Standards, “Ieee 802 working group and executive committee study group home pages,” Published Online, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, INTERNET-DRAFT, July 2006, day 21. [Online]. Available: <http://grouper.ieee.org/groups/802/dots.html>
- [10] L. F. G. Soares, G. L. de Souza, and S. Colcher, *Redes de Computadores - Das LANs, MANs e WANs às Redes ATM.*, 2nd ed., Campus, Ed. Campus, 1995.
- [11] I. Nikolaidis, M. Barbeau, and E. Kranakis, Eds., *Ad-Hoc, Mobile, and Wireless Networks: Third International Conference, ADHOC-NOW 2004, Vancouver, Canada, July 22-24, 2004. Proceedings*, ser. Lecture Notes in Computer Science, vol. 3158. Springer, 2004.
- [12] M. Mauve, J. Widmer, and H. Hartenstein, “A Survey on Position-Based Routing in Mobile Ad-Hoc Networks,” *IEEE Network Magazine*, vol. 15, no. 6, pp. 30–39, November 2001.

- [13] T. W. G. for WPAN Standards, “Ieee 802.15 working group for wireless personal area networks (wpans),” Published Online, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, INTERNET-DRAFT, May 2006, day 28. [Online]. Available: <http://www.ieee802.org/15/>
- [14] I. S. Association, “Ieee-sa get ieee 802.15 wireless pans,” Published Online, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, INTERNET-DRAFT, May 2006, day 28. [Online]. Available: <http://standards.ieee.org/getieee802/802.15.html>
- [15] T. W. G. for WLAN Standards, “Ieee 802 wireless local area networks,” Published Online, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, INTERNET-DRAFT, May 2006, day 29. [Online]. Available: <http://www.ieee802.org/11/>
- [16] A. de Ribamar Lima Ribeiro, “Sensorbus: Um middleware baseado em políticas para redes de sensores sem fio.” Ph.D. dissertation, Universidade Federal do Pará, 2007.
- [17] C. E. Perkins and P. Bhagwat, “Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing (dsv) for mobile computers,” in *ACM Conference on Communications Architectures, Protocols and Applications, SIGCOMM '94, London, UK*, ACM. ACM, August 1994, pp. 234–244. [Online]. Available: <http://people.nokia.net/charliep/txt/sigcomm94/paper.ps>
- [18] C. Perkins and P. Bhagwat, “Dsv routing over a multihop wireless network of mobile computers,” pp. 53–74, 2001.
- [19] P. Jacquet, P. Mühlethaler, and A. Qayyum, “Optimized link state routing protocol,” Published Online, IETF MANET Working Group, INTERNET-DRAFT, November 1998, expiration: May 1999. [Online]. Available: <http://www.ietf.org/proceedings/98dec/I-D/draft-ietf-manet-olsr-00.txt>
- [20] P. Jacquet, P. Mühlethaler, T. Clausen, A. Laouiti, A. Qayyum, and L. Viennot, “Optimized link state routing protocol,” in *IEEE INMIC'01, 28-30 December 2001, Lahore, Pakistan*, IEEE. IEEE, December 2001, pp. 62–68. [Online]. Available: <http://hipercom.inria.fr/olsr/inmic2001.ps>
- [21] A. Laouiti, P. Mühlethaler, A. Najid, and E. Plakoo, “Simulation results of the olsr routing protocol for wireless network,” Institut National de Recherche En Informatique et en Automatique, Tech. Rep. 4414, Mars 2002. [Online]. Available: <ftp://ftp.inria.fr/INRIA/publication/dienst/RR-4414.pdf>
- [22] S. Murthy and J. Garcia-Luna-Aceves, “An efficient routing protocol for wireless networks,” *Mobile Networks and Applications, Special Issue on Routing in Mobile Communication Networks*, vol. 1, no. 2, pp. 183–197, 1996.
- [23] S. Murthy and J. J. Garcia-Luna-Aceves, “A routing protocol for packet radio networks,” in *The First International Conference on Mobile Computing and Networking, ACM MOBICOM'95, November 13-15, 1995, Berkeley, California, USA*, ACM. ACM, November 1995, pp. 86–95. [Online]. Available: <http://www.cse.ucsc.edu/research/ccrg/publications/shree.mcn95.ps.gz>
- [24] D. B. Johnson and D. A. Maltz, “Dynamic source routing in ad hoc wireless networks,” in *Mobile Computing*, T. Imielinski and H. Korth, Eds. Kluwer Academic Publishers, 1996, vol. 353, ch. 5, pp. 153–181. [Online]. Available: <http://www.ics.uci.edu/~atm/adhoc/paper-collection/johnson-dsr.pdf>

- [25] C. E. Perkins and E. M. Royer, “Ad-hoc on-demand distance vector routing,” in *2nd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications, WMCSA '99, February 25-26, 1999, New Orleans, Louisiana, USA*, IEEE. IEEE, February 1999, pp. 90–100. [Online]. Available: <http://www.research.att.com/conf/wmcsa99/papers/perkins.ps.gz>
- [26] A. A. Junior and O. C. M. B. Duarte, “Segurança no roteamento em redes móveis ad hoc,” *Seminário de Tópicos Especiais em Redes de Computadores. Rio de Janeiro: GTA - Universidade Federal do Rio de Janeiro*, vol. 1, pp. 1–16, 2003. [Online]. Available: <http://www.gta.ufrj.br/seminarios/CPE825/tutoriais/aurelio/AmDu03.pdf>
- [27] C. Perkins and E. Royer, “The ad hoc on-demand distance-vector protocol,” pp. 173–219, 2001.
- [28] C. E. Perkins, E. M. Belding-Royer, and S. R. Das, “Ad hoc on-demand distance vector routing protocol,” Published Online, IETF MANET Working Group, INTERNET-DRAFT, February 2003 2003, expiration: August 17, 2003. [Online]. Available: <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-manet-aodv-13.txt>
- [29] A. Mele, “Um framework para simulação de redes móveis “ad hoc”,” Master’s thesis, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, December 2002, http://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/tesesabertas/0016060_02_pretexto.pdf.
- [30] V. D. Park and M. S. Corson, “A highly adaptive distributed routing algorithm for mobile wireless networks,” in *IEEE Conference on Computer Communications, INFOCOM'97, April 7-11, 1997, Kobe, Japan*, vol. 3, IEEE. IEEE, April 1997, pp. 1405–1413. [Online]. Available: <http://www.ics.uci.edu/~atm/adhoc/paper-collection/corson-adaptive-routing-infocom97.pdf>
- [31] G. Pei, M. Gerla, and T.-W. Chen, “Fisheye state routing in mobile ad hoc networks,” in *Proceedings of ICDCS Workshop on Wireless Networks and Mobile Computing, April 2000, Taipei, Taiwan*. ICDCS, April 2000, pp. D71–D78. [Online]. Available: <http://www.cs.ucla.edu/NRL/wireless/PAPER/pei-wnmc00.ps.gz>
- [32] Z. J. Haas, “A new routing protocol for the reconfigurable wireless networks,” *IEEE International Conference on Universal Personal Communications, San Diego, California, USA.*, vol. 2, no. 6, pp. 562–566, Octobe 1997.
- [33] A. Iwata, C.-C. Chiang, G. Pei, M. Gerla, and T.-W. Chen, “Scalable routing strategies for ad hoc wireless networks,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 17, no. 8, pp. 1369–1379, August 1999. [Online]. Available: <http://www.cs.ucla.edu/NRL/wireless/PAPER/jsac99.ps.gz>
- [34] R. Draves, J. Padhye, and B. Zill, “Routing in multi-radio, multi-hop wireless mesh networks,” in *MobiCom '04: Proceedings of the 10th annual international conference on Mobile computing and networking*. New York, NY, USA: ACM Press, 2004, pp. 114–128.
- [35] J. Hauser, D. Baker, and W. S. Conner, “Draft par for ieee 802.11 ess mesh,” IEEE P802.11 Wireless LANs, Tech. Rep., November 2003.
- [36] I. F. Akyildiz and X. Wang, “A survey on wireless mesh networks,” *Communications Magazine, IEEE*, vol. 43, no. 9, pp. S23–S30, September 2005. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/35/32334/01509968.pdf>

- [37] S. M. Faccin, C. Wijting, J. Kenckt, and A. Damle, “Mesh wlan networks: concept and system design,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 13, no. 2, pp. 10–17, April 2006. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/7742/34234/01632476.pdf>
- [38] S.-J. Lee, J. Hsu, R. Hayashida, M. Gerla, and R. Bagrodia, “Selecting a routing strategy for your ad hoc network,” *The International Journal for the Computer and Telecommunications Industry*, vol. 26, pp. 723–733, 2003. [Online]. Available: http://www.cs.ucla.edu/NRL/wireless/uploads/SJ_cc_2002.pdf
- [39] E. Royer and C. Toh, “A review of current routing protocols for ad-hoc mobile wireless networks,” *IEEE Personal Communications*, vol. 2, no. 6, pp. 46–55, April 1999.
- [40] K. Sundaresan, R. Sivakumar, and M. A. Ingram, “A fair medium access control protocol for ad-hoc networks with mimo links,” in *INFOCOM. Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, vol. 4, March 2004, pp. 2559–2570.
- [41] W. Xiang, T. Pratt, and X. Wang, “A software radio testbed for two-transmitter two-receiver space-time coding ofdm wireless lan,” *Communications Magazine, IEEE*, vol. 42, pp. S20–S28, June 2004.
- [42] A. Adya, P. Bahl, J. Padhye, A. Wolman, and L. Zhou, “A multi-radio unification protocol for ieee 802.11 wireless networks,” in *BROADNETS '04: Proceedings of the First International Conference on Broadband Networks (BROADNETS'04)*. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2004, pp. 344–354.
- [43] J. So and N. H. Vaidya, “Multi-channel mac for ad hoc networks: handling multi-channel hidden terminals using a single transceiver,” in *MobiHoc '04: Proceedings of the 5th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*. New York, NY, USA: ACM Press, 2004, pp. 222–233.
- [44] B. Lane, “Cognitive radio technologies in the commercial arena,” in *FCC Workshop on Cognitive Radios*, May 2003.
- [45] M. McHenry, “Frequency agile spectrum access technologies,” in *FCC Workshop on Cognitive Radios*, May 2003.
- [46] A. B. Bondi, “Characteristics of scalability and their impact on performance,” in *WOSP '00: Proceedings of the 2nd international workshop on Software and performance*. New York, NY, USA: ACM Press, 2000, pp. 195–203.
- [47] J. Bicket, D. Aguayo, S. Biswas, and R. Morris, “Architecture and evaluation of an unplanned 802.11b mesh network,” in *Proceedings of the 11th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '05)*, Cologne, Germany, August 2005.
- [48] I. P802.15.4/D18, “Draft standard: Low rate wireless personal area networks,” IEEE P802.15 Working Group for Wireless Personal Area Networks, Tech. Rep., February 2003.
- [49] J. Zheng, Y. Liu, C. Zhu, M. Wong, and M. Lee, “Ieee 802.15.5 wpan mesh networks,” IEEE P802.15 Working Group for Wireless Personal Area Networks, Tech. Rep., May 2005, day 13. [Online]. Available: <http://www.ieee802.org/15/pub/05/15-05-0260-00-0005-802-15-5-mesh-networks.pdf>
- [50] R. Bruno, M. Conti, and E. Gregori, “Mesh networks: Commodity multihop ad hoc networks,” *Communications Magazine, IEEE*, vol. 43, pp. 123–131, March 2005.

- [51] N. Tsarmopoulos, I. Kalavros, and S. Lalis, “A low-cost and simple-to-deploy peer-to-peer wireless network based on open source linux routers,” *Tridentcom*, vol. 00, pp. 92–97, 2005.
- [52] E. M. Belding-Royer, K. C. Almeroth, H. Lundgren, K. Ramachandran, A. Jardosh, M. Benny, and A. Hewatt, “Santa barbara mesh network.” [Online]. Available: <http://moment.cs.ucsb.edu/meshnet>
- [53] C. V. N. de Albuquerque, D. C. M. Saade, J. Leite, L. C. S. Magalhães, D. V. Teixeira, L. E. Neves, and J. E. M. da Fonseca, “Gt-mesh - termo de referência e estado da arte,” RNP - Rede Nacional de Ensino e Pesquisa, Tech. Rep., Fevereiro 2006, day 15.
- [54] N. R. Group, “Self-organizing neighborhood wireless mesh networks,” Microsoft, Tech. Rep., 2006. [Online]. Available: <http://research.microsoft.com/mesh>
- [55] G. F. Amorim, “Análise de desempenho de protocolos de roteamento com diferenciação de serviços em redes de comunicação móvel ad hoc,” Master’s thesis, Instituto Militar de Engenharia - Rio de Janeiro, 2002.
- [56] J. J. Garcia-Luna-Aceves, “Loop-free routing using diffusing computations,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 1, no. 1, pp. 130–141, 1993. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/iel4/90/5814/00222913.pdf>
- [57] J. Broch, D. A. Maltz, D. B. Johnson, Y.-C. Hu, and J. Jetcheva, “A performance comparison of multi-hop wireless ad hoc network routing protocols,” in *MobiCom '98: Proceedings of the 4th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*. New York, NY, USA: ACM Press, 1998, pp. 85–97.
- [58] D. S. J. D. Couto, D. Aguayo, J. Bicket, and R. Morris, “A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing,” *Wirel. Netw.*, vol. 11, no. 4, pp. 419–434, 2005.
- [59] R. Jain, *The art of computer systems performance analysis: techniques for experimental design, measurement, simulation, and modeling*, I. John Wiley & Sons, Ed. John Wiley & Sons, Inc, 1991.
- [60] K. Fall and K. Varadhan, “The ns manual (formerly ns notes and documentation),” April 2007.