

Um Protocolo de Roteamento Escalável com QoS para Redes Mesh sem Fio com Múltiplos Rádios

Este exemplar corresponde à redação final da Dissertação devidamente corrigida e defendida por Rachel de Carvalho Paschoalino e aprovada pela Banca Examinadora.

Campinas, 21 de fevereiro de 2008.



Prof. Dr. Edmundo Roberto Mauro Madeira
(Orientador)

Dissertação apresentada ao Instituto de Computação, UNICAMP, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DO IMECC DA UNICAMP**

Bibliotecária: Maria Júlia Milani Rodrigues – CRB8a / 2116

Paschoalino, Rachel de Carvalho

P262p Um protocolo de roteamento escalável com QoS para redes mesh sem fio com múltiplos rádios / Rachel de Carvalho Paschoalino -- Campinas, [S.P. :s.n.], 2008.

Orientador : Edmundo Roberto Mauro Madeira

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Computação.

1. Redes de computadores. 2. Redes sem fio em malha. 3. Roteamento com qualidade de serviço. I. Madeira, Edmundo Roberto Mauro. II. Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Computação. III. Título.

Título em inglês: A scalable QoS routing protocol for multi-radio wireless mesh networks.

Palavras-chave em inglês (Keywords): 1. Computer networks. 2. Wireless mesh networks. 3. QoS (routing)

Área de concentração: Redes de computadores

Titulação: Mestre em Ciência da Computação

Banca examinadora:

Prof. Dr. Edmundo Roberto Mauro Madeira (IC/UNICAMP)
Prof. Dr. Otto Carlos Muniz Bandeira Duarte (COPPE/UFRJ)
Prof. Dr. Nelson Luis Saldanha da Fonseca (IC/UNICAMP)
Prof. Dr. Ricardo de Oliveira Anido (IC/UNICAMP)

Data da defesa: 21/02/2008

Programa de Pós-Graduação: Mestrado em Ciência da Computação

TERMO DE APROVAÇÃO

Dissertação Defendida e Aprovada em 21 de fevereiro de 2008, pela Banca examinadora composta pelos Professores Doutores:



Prof. Dr. Otto Carlos Muniz-Bandeira Duarte
COPPE - UFRJ.



Prof. Dr. Nelson Luis Saldanha da Fonseca
IC - UNICAMP.



Prof. Dr. Edmundo Roberto Mauro Madeira
IC - UNICAMP.

Um Protocolo de Roteamento Escalável com QoS para Redes Mesh sem Fio com Múltiplos Rádios

Rachel de Carvalho Paschoalino

Fevereiro de 2008

Banca Examinadora:

- Prof. Dr. Edmundo Roberto Mauro Madeira (Orientador)
- Prof. Dr. Otto Carlos Muniz Bandeira Duarte
COPPE - UFRJ
- Prof. Dr. Nelson Luis Saldanha da Fonseca
IC - UNICAMP
- Prof. Dr. Ricardo de Oliveira Anido (suplente)
IC - UNICAMP

Resumo

Devido à facilidade de implantação e gerência, as redes *mesh* sem fio constituem uma escolha natural para atender a crescente demanda por acesso sem fio com cobertura em larga escala. Formadas por roteadores *mesh* interligados através de enlaces sem fio, as WMNs (*Wireless Mesh Networks*) fornecem um *backbone* flexível para diversas aplicações e serviços. Entretanto, os protocolos de roteamento existentes aplicados às WMNs não provêem escalabilidade, reduzindo a vazão conforme o tamanho da rede aumenta. Esta dissertação apresenta um protocolo de roteamento escalável com QoS para WMNs multi-rádio. Incorporamos uma métrica local de qualidade do enlace e suporte a múltiplos rádios ao protocolo OLSR (*Optimized Link State Routing*). A métrica de qualidade é usada na seleção de nós especiais de *relay*, que irão compor as rotas. Variações na métrica de qualidade são tratadas na vizinhança de 1 salto, preservando estabilidade no roteamento. Por sua vez, o uso de múltiplos rádios por nó provê um melhor aproveitamento do espectro sem fio, minimizando a contenção. Essa abordagem simples e escalável permite distribuir o tráfego na rede por caminhos com enlaces de melhor qualidade. Através das simulações realizadas, demonstramos que o protocolo proposto, chamado LQ-OLSR (*Link Quality OLSR*), traz melhorias expressivas na vazão, atraso e perda de pacotes em relação ao OLSR original, com um aumento mínimo do *overhead*.

Abstract

Due to their deployment and management simplicity, Wireless Mesh Networks (WMNs) have become a natural way to fulfill the increasing demand for large area wireless coverage. Formed by mesh routers connected by wireless links, WMNs provide a flexible backbone for various applications and services. Nevertheless, the available routing protocols applied to WMNs suffer from scalability, where throughput decreases as the number of nodes grows. In this thesis, a scalable QoS routing protocol for multi-radio WMNs is proposed. We incorporate a local link quality metric and multi-radio support in the OLSR (Optimized Link State Routing) protocol. The quality metric is used in the selection of relay nodes which will form the routes. Significant changes to link quality metric are treated in 1-hop neighborhood, preserving route stability. Using multiple radios in each node allows a better utilization of the wireless spectrum, minimizing contention. This simple and scalable approach permits traffic distribution among better quality links. Simulations were conducted and the results showed expressive performance improvements concerning throughput, delay and packet loss of the proposed protocol LQ-OLSR (Link Quality OLSR) over the original OLSR, with a minimum overhead increase.

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais pelo apoio, confiança e carinho que sempre fizeram parte da minha vida.

Ao Fabião, que seguiu comigo o caminho até aqui, pela paciência, compreensão e amor dedicados durante todos os momentos.

Ao meu orientador, Prof. Edmundo Madeira, pela oportunidade oferecida e pela orientação construtiva e desafiadora.

À Aninha e Mariana, pelo apoio e incentivo nos momentos difíceis. E à minha irmã, amigas e amigos queridos, pelas horas de diversão juntos, sempre.

Aos colegas de trabalho, pela paciência no dia-a-dia, e ao Guto e Queiroz, pelas sugestões sempre bem vindas.

Aos meus sogros e a todos que acompanharam meu esforço e torceram por mim.

Sumário

Resumo	v
Abstract	vi
Agradecimentos	vii
1 Introdução	1
2 Redes sem fio	4
2.1 Redes locais sem fio	4
2.2 Redes <i>ad hoc</i> móveis	6
2.3 Redes <i>mesh</i> sem fio	8
2.3.1 WLAN x MANET x WMN	11
2.3.2 Aplicações	12
3 MAC IEEE 802.11 e Roteamento	16
3.1 MAC IEEE 802.11	16
3.1.1 Interferência em redes sem fio multi-salto	17
3.1.2 Múltiplos rádios e alocação de canais	19
3.2 Roteamento	20
3.2.1 Métricas de roteamento	21
3.2.2 Isotonicidade	22
4 Trabalhos relacionados	24
4.1 Roteamento em redes ad hoc móveis (MANETs)	24
4.2 Alocação de canais e roteamento em MANETs multi-rádio	27
4.3 Alocação de canais e roteamento em WMNs multi-rádio	27
5 Protocolo de roteamento LQ-OLSR	32
5.1 Cenário de estudo	32

5.2	Motivação	33
5.3	Idéias centrais	35
5.4	Protocolo OLSR	36
5.4.1	Otimização do processo de inundação de mensagens: MPR	37
5.4.2	Seleção de rotas	38
5.5	Protocolo proposto: LQ-OLSR	39
5.5.1	Métrica de qualidade dos enlaces	39
5.5.2	Seleção de MPRs	41
5.5.3	Seleção de rotas	43
5.5.4	Versão LQ2-OLSR	45
5.5.5	Suporte a múltiplos rádios	46
5.5.6	Implementação	47
6	Simulação e resultados	50
6.1	Parâmetros de simulação	50
6.2	Cenários de simulação	51
6.3	Alocação de canais	52
6.4	Resultados	53
7	Conclusão	65
	Referências Bibliográficas	67

Lista de Tabelas

2.1	Tabela comparativa das arquiteturas WLAN, MANET e WMN	12
6.1	Parâmetros do NS-2 usados nas simulações.	51
6.2	Parâmetros do OLSR usados nas simulações	51
6.3	Cenários usados nas simulações.	52

Lista de Figuras

2.1	WLAN infra-estruturada.	5
2.2	WLAN <i>ad-hoc</i>	5
2.3	Rede <i>ad hoc</i> móvel (MANET).	7
2.4	Rede <i>mesh</i> sem fio (WMN) infra-estruturada.	9
2.5	Rede <i>mesh</i> sem fio (WMN) cliente.	10
2.6	Rede <i>mesh</i> sem fio (WMN) híbrida.	10
2.7	WMNs para rede de um campus universitário.	13
2.8	WMNs para redes comunitárias.	14
2.9	WMNs para redes metropolitanas.	15
3.1	Efeito da interferência em redes sem fio multi-salto.	18
3.2	Interferência intra-fluxo.	18
3.3	Interferência entre fluxos.	19
3.4	Arquitetura multi-rádio.	19
3.5	Exemplo de isotonicidade.	23
5.1	Cenário de WMN infra-estruturada multi-rádio.	33
5.2	Exemplo de inundação simples (a) e com o uso de MPRs (b).	38
6.1	Exemplo de alocação de canais utilizada.	53
6.2	Vazão (<i>goodput</i>) em cenário com 50 nós.	54
6.3	Atraso em cenário com 50 nós.	55
6.4	Descarte de pacotes em cenário com 50 nós.	56
6.5	Quebra de enlaces em cenário com 50 nós.	56
6.6	Descarte de pacotes por falta de rota em cenário com 50 nós.	57
6.7	Descarte de pacotes por estouro de fila em cenário com 50 nós.	58
6.8	Mudanças de rota em cenário com 50 nós.	58
6.9	<i>Overhead</i> de roteamento em cenário com 50 nós.	59
6.10	Vazão (<i>goodput</i>) em cenário com 100 nós.	60
6.11	Atraso em cenário com 100 nós.	61
6.12	Descarte de pacotes em cenário com 100 nós.	61

6.13	Descarte de pacotes por falta de rota em cenário com 100 nós.	62
6.14	Descarte de pacotes por estouro de fila em cenário com 100 nós.	62
6.15	Quebra de enlaces em cenário com 100 nós.	63
6.16	Mudanças de rota em cenário com 100 nós.	63
6.17	<i>Overhead</i> de roteamento em cenário com 100 nós.	64

Lista de Acrônimos

ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
AODV	Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing
AODV-MR	Multi-radio AODV
AP	Access Point
BSS	Basic Service Set
CA-OLSR	Channel Assignment OLSR
CBR	Constant Bit Rate
CSC	Channel Switching Cost
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
DCF	Distributed Coordination Function
DSR	Dynamic Source Routing
ESS	Extended Service Set
ETT	Expected Transmission Time
ETX	Expected Transmission Count
GPL-2	GNU General Public License
HWMP	Hybrid Wireless Mesh Protocol
iAWARE	interference Aware
ILA	Interference-Load Aware
IR	Interference Ratio
IRU	Interference-aware Resource Usage
LQ-OLSR	Link Quality OLSR
LQ2-OLSR	2-hop Link Quality OLSR
LQSR	Link Quality Source Routing
LSP	Link State Packet
MAC	Medium Access Control
MANET	Mobile Ad-hoc Network
MCCA	MaxFlow-based Centralized Channel Assignment
MCR	Multi-channel Routing
MIC	Metric of Interference and Channel Switching
MMBDP	Mobile Mesh Border Discovery Protocol

MMLDP	Mobile Mesh Link Discovery Protocol
MMRP	Mobile Mesh Routing Protocol
MPR	Multipoint Relay
MR-LQSR	Multi-radio LQSR
MTI	Metric of Traffic Interference
NLOS	Non-line-of-sight
NS-2	Network Simulator
OLSR	Optimized Link State Routing
OOLSR	Object oriented OLSR
Otcl	MIT Object TCL
P2P	Peer-to-Peer
PCF	Point Coordination Function
PDA	Personal Digital Assistant
QOLSR	Quality of Service for Ad hoc Optimized Link State Routing
QoS	Quality of Service
RA-OLSR	Radio-Aware OLSR
RFC	Request for Comments
RM-AODV	Radio Metric AODV
RREP	Route Reply
RREQ	Route Request
RTS/CTS	Request To Send/Clear To Send
SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio
TBRPF	Topology Broadcast Based on Reverse-Path Forwarding
TC	Topology Control
TCP	Transmission Control Protocol
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
UDP	User Datagram Protocol
VoIP	Voice over IP
WCETT	Weighted Cumulative Expected Transmission Time
WLAN	Wireless Local Area Network
WMAN	Wireless Metropolitan Area Network
WMN	Wireless Mesh Network
WMR	Wireless Mesh Routing
WPAN	Wireless Personal Area Network

Capítulo 1

Introdução

O padrão de redes locais sem fio (WLANs¹) 802.11 [21], comercialmente conhecido como Wi-Fi, é a tecnologia mais difundida e utilizada em redes sem fio atualmente. Esta tecnologia tem a simplicidade e o baixo custo como características principais, o que levou à sua grande utilização como uma opção de conectividade.

A popularização das redes Wi-Fi trouxe um grande interesse no desenvolvimento de redes que suportem acesso sem fio com cobertura em larga escala. Nestes cenários, podem ser empregados pontos de acesso (AP²) com maior alcance, porém o custo de implantação dessas redes em áreas grandes é dominado pelo custo da rede necessária para interligar os APs e conectá-los à Internet. O custo para prover uma conexão cabeada (Ethernet, ADSL³ ou E1) para cada AP é muito alto. A alternativa atraente é montar um *backbone* sem fio, onde os APs se comunicam por enlaces sem fio e apenas alguns APs precisam de conexão cabeada para permitir que toda a rede tenha acesso à Internet [9].

A facilidade de implantação de redes sem fio e a escalabilidade da topologia *mesh* tornam a rede *mesh* sem fio (WMN⁴) a escolha apropriada para prover cobertura sem fio em redes de áreas locais, de campi e metropolitanas. As WMNs têm atraído interesse acadêmico [1, 39] e comercial [8, 11, 30, 33], pois formam um *backbone* sem fio para novas aplicações e serviços.

Uma rede *mesh* sem fio (WMN) é composta por dois tipos de nós - roteadores *mesh* e clientes *mesh* - onde os roteadores têm mobilidade mínima e formam o *backbone* sem fio (*backhaul*) da WMN [2]. Os roteadores *mesh* funcionam também como pontos de acesso para os clientes. Alguns roteadores *mesh* possuem funcionalidades de *gateway* e provêm conectividade com outras redes, tais como a Internet e outras redes sem fio. Os clientes usam os roteadores como nós intermediários para acessar outros clientes ou a Internet.

¹Wireless Local Area Networks

²Access Point

³Asymmetric Digital Subscriber Line

⁴Wireless Mesh Network

Algumas características fundamentais das WMNs são a natureza estática dos roteadores *mesh*, a topologia de múltiplos saltos (*multi-hop*) e a capacidade de auto-organização e auto-configuração dos nós, simplificando a instalação e a gerência. Através dos nós *gateways*, as WMNs possibilitam integração com outras redes sem fio, tal como redes WiMAX. A combinação da topologia *mesh* e tecnologia sem fio provê uma rede confiável com alto grau de flexibilidade. Por suas características, as redes *mesh* sem fio permitem uma extensão fácil e rápida das WLANs, o que as tornam uma técnica promissora para as redes sem fio da próxima geração. Atualmente, existem vários grupos de trabalho do IEEE⁵ para padronização de WMNs, tais como 802.15.5 [24] para conectividade *mesh* de WPANs⁶, 802.11s [23] para WLANs *mesh* e 802.16j [26] para 802.16 *multihop relaying*.

Vários cenários de aplicação têm motivado os estudos sobre WMNs, tais como redes Wi-Fi de larga escala, redes de banda larga sem fio, redes comunitárias e redes metropolitanas sem fio (WMANs⁷). Estas redes apresentam tráfego heterogêneo e devem suportar a crescente demanda por aplicações multimídia e de tempo real, o que requer largura de banda, controle de atraso e *jitter*, entre outros. Portanto, é altamente desejável fornecer mecanismos que garantam qualidade de serviço (QoS⁸) em WMNs, tanto em cenários atuais quanto futuros.

Para suportar a função de *backhaul*, as WMNs precisam ser aperfeiçoadas para endereçar questões como capacidade, vazão, atraso e alcance [49]. A área de cobertura pode ser expandida adicionando-se roteadores/APs na rede. Entretanto, mesmo com o avanço da tecnologia sem fio nos últimos anos, a largura de banda sem fio é limitada se comparada com as tecnologias cabeadas [50]. O acesso baseado em contenção do IEEE 802.11 ainda é um ponto fraco para transmissão de aplicações multimídia de tempo real [49]. As características inerentes do meio sem fio, com altas taxas de perda, atraso e *jitter*, impõem um grande desafio na obtenção de QoS em redes *mesh* sem fio.

A capacidade de uma rede sem fio é reduzida devido à interferência entre transmissões simultâneas [19]. A transmissão de pacotes entre dois nós é chamada fluxo. Nas WMNs, o desempenho da rede é afetado por dois tipos de interferência: *interferência intra-fluxo*, gerada por nós adjacentes num mesmo caminho, e *interferência entre fluxos*, causada por nós de caminhos vizinhos [18]. O uso de múltiplos rádios por nó é um método eficaz para minimizar interferências e melhorar a capacidade das WMNs, e se justifica pela função de *backhaul* exercida por essas redes. Com o crescente avanço da tecnologia e o barateamento das interfaces sem fio, acreditamos que uma solução com múltiplas interfaces (multi-rádio) é viável e vantajosa para implantar redes *mesh* sem fio.

O projeto do protocolo de roteamento afeta diretamente o desempenho das WMNs.

⁵Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.

⁶Wireless Personal Area Networks

⁷Wireless Metropolitan Area Networks

⁸Quality of Service

Nos últimos anos, as pesquisas sobre roteamento em redes sem fio foram voltadas para redes *ad-hoc* móveis (MANETs⁹). Embora as WMNs compartilhem várias características com as MANETs, existem requisitos específicos que tornam os protocolos de roteamento desenvolvidos para essas redes não apropriados para as redes *mesh* [2].

Escalabilidade é a questão mais crítica em WMNs [2]. A abordagem da maioria dos protocolos de roteamento propostos para WMNs multi-rádio [15, 47, 48] envolve estimar, em cada nó, a capacidade de banda disponível, o tempo de transmissão, a carga por canal, entre outros, difundir essas informações pela rede, e combiná-las para encontrar um caminho ótimo. A dificuldade no cálculo dessas medidas, aliada às flutuações de tráfego, impõe limitações práticas à computação de métricas de roteamento cumulativas. Além disso, com o aumento do número de fluxos, fato esperado em *backbones*, essas métricas fim-a-fim podem não apresentar bom desempenho, devido à interferência entre fluxos e ao *overhead* de controle.

Este trabalho apresenta um protocolo de roteamento com QoS dirigido para redes *mesh* sem fio com múltiplos rádios, preservando escalabilidade. O protocolo é direcionado aos roteadores *mesh*, que formam a infra-estrutura de comunicação - *backhaul* - usada pelos clientes. Nossa proposta [38, 37] consiste numa extensão de QoS do protocolo OLSR (*Optimized Link State Routing*) [12] incluindo a qualidade dos enlaces na seleção de nós especiais, chamados MPRs¹⁰, que transmitem as mensagens de topologia da rede e são usados na construção das rotas. Dessa forma, o roteamento é feito através de enlaces com maior qualidade, aumentando o desempenho da rede. Também incorporamos o suporte a múltiplos rádios por nó. As simulações realizadas demonstram que o protocolo desenvolvido, chamado LQ-OLSR (*Link Quality OLSR*), duplica a vazão da rede e diminui a latência em até 86%. Nosso trabalho foi desenvolvido com o padrão atual IEEE 802.11, mas pode ser implantado em redes IEEE 802.16 [25].

Essa dissertação está organizada da seguinte forma. O Capítulo 2 apresenta as principais arquiteturas de redes sem fio e traça uma comparação entre elas. No Capítulo 3, descrevemos de maneira sucinta as funcionalidades de camada MAC¹¹ do padrão IEEE 802.11 e os problemas de interferência em redes sem fio com múltiplos saltos. Também definimos os tipos de protocolos de roteamento existentes para redes sem fio e suas características. Os principais trabalhos relacionados são apresentados no Capítulo 4. O cenário de estudo e o protocolo de roteamento proposto estão descritos no Capítulo 5. Os resultados e a análise das simulações são mostrados no Capítulo 6. A conclusão do trabalho é apresentada no Capítulo 7.

⁹Mobile Ad-hoc Networks

¹⁰Multipoint Relay

¹¹Medium Access Control

Capítulo 2

Redes sem fio

Neste capítulo, descrevemos algumas arquiteturas de redes sem fio, considerando suas características e cenários de aplicação, e fazemos uma comparação entre elas.

2.1 Redes locais sem fio

As redes locais sem fio (WLANs¹) IEEE 802.11, conhecidas como Wi-Fi, são usadas em larga escala atualmente. As WLANs permitem que dispositivos clientes sem fio, tais como *laptops*, *PDA*s², *smartphones*, etc., comuniquem diretamente entre si, em modo *ad hoc*, ou através de um ponto de acesso (AP), no modo infra-estruturado.

No modo infra-estruturado, um ponto de acesso centraliza a conexão de diversos clientes, o que é conhecido como topologia ponto-multiponto. A conexão direta entre clientes e AP permite que a comunicação sem fio seja feita usando um único salto (*single-hop*). O AP pode funcionar também como uma ponte para a rede cabeada, possibilitando aos clientes o acesso à Internet. Esta é a aplicação mais comum de WLANs e está representada na Figura 2.1. Como os clientes acessam diretamente o AP (único salto), não há necessidade de roteamento nessas redes.

As WLANs também operam no modo *ad hoc*, onde os clientes se interconectam sem a necessidade de qualquer infra-estrutura adicional [50]. Neste modo, dispositivos sem fio dentro de um raio mútuo de alcance podem se descobrir e comunicar diretamente sem o uso de APs centrais, formando uma rede *peer-to-peer*, conforme ilustrado na Figura 2.2.

As WLANs são voltadas para ambientes residenciais ou escritórios pequenos, com algumas dezenas de usuários. A simplicidade e o baixo custo desta tecnologia levaram à sua popularização como opção de conectividade em ambientes com tamanho reduzido.

¹Wireless Local Area Networks

²Personal Digital Assistant

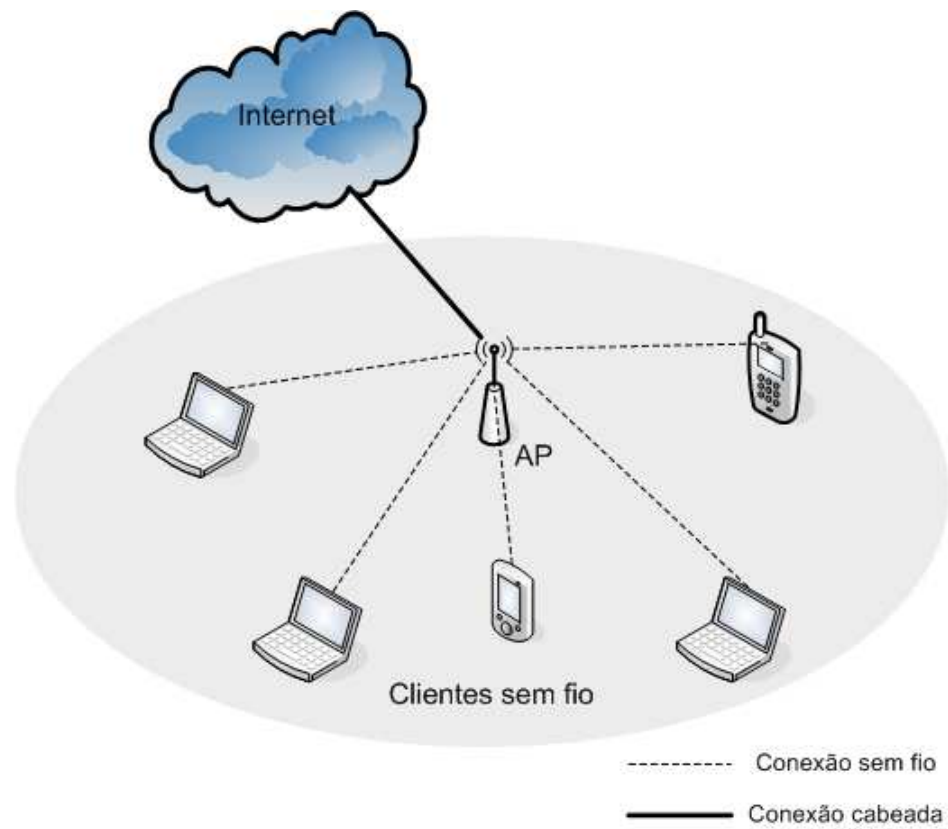
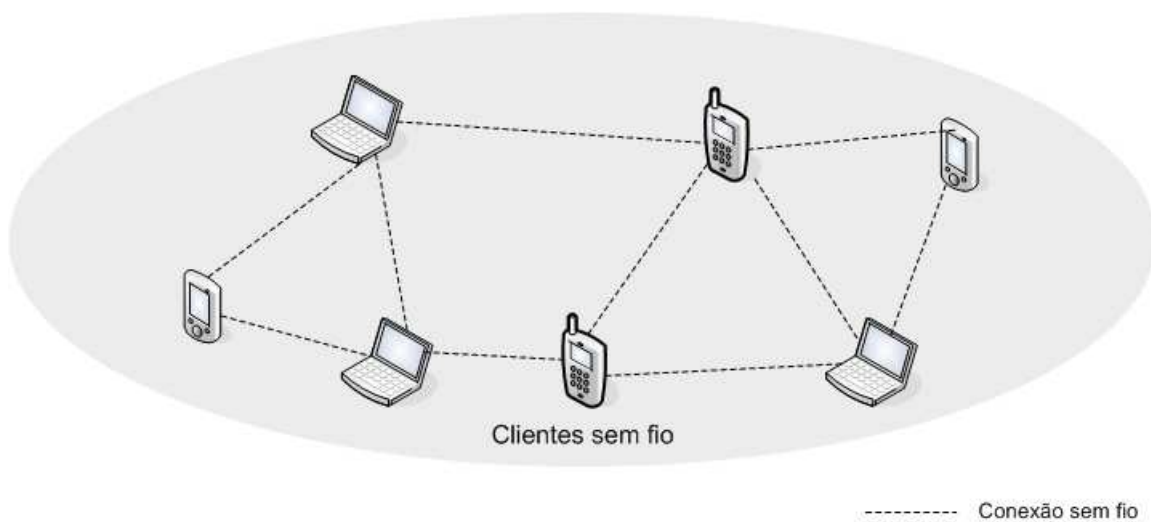


Figura 2.1: WLAN infra-estruturada.

Figura 2.2: WLAN *ad-hoc*.

Atualmente, as WLANs são comumente implantadas como *hot spots* em ambientes internos, tais como cafés, livrarias, saguões de aeroportos, etc, atendendo uma área de cobertura de até 250m usando o modo infra-estruturado. Cada AP precisa ter uma conexão cabeada para permitir o acesso à Internet. Nestes cenários, escalabilidade e desempenho não são fatores críticos. Porém, essa arquitetura se torna cara, complexa e difícil em ambientes externos [49].

Enlace/Físico

A operação de WLANs é definida pela família de padrões IEEE 802.11. O protocolo de camada MAC do IEEE 802.11 usa o mecanismo de CSMA/CA³ para coordenar o acesso ao meio e minimizar colisões, através de técnicas de contenção de acesso. O CSMA/CA é baseado em compartilhamento do meio e em transmissões com um único salto. O funcionamento do mecanismo de CSMA/CA é explicado resumidamente no Capítulo 3.

O avanço da tecnologia 802.11 e a popularização de dispositivos clientes sem fio na última década motivaram o interesse por redes *ad hoc*. A flexibilidade de implantação dessa topologia incentivou o uso de novas aplicações em redes *ad hoc* móveis.

2.2 Redes *ad hoc* móveis

As redes *ad hoc* móveis (MANET⁴) são formadas por nós, geralmente móveis, conectados dinamicamente entre si através de enlaces sem fio [51]. Nessa arquitetura, os nós (ou dispositivos sem fio) constituem a rede, dispensando a existência de uma infra-estrutura prévia. Os nós funcionam também como roteadores, repassando os pacotes de/para outros nós na rede. Para possibilitar a comunicação entre um par de nós, um pacote transpõe vários enlaces sem fio, ou seja, o caminho é composto por múltiplos saltos (*multi-hop*).

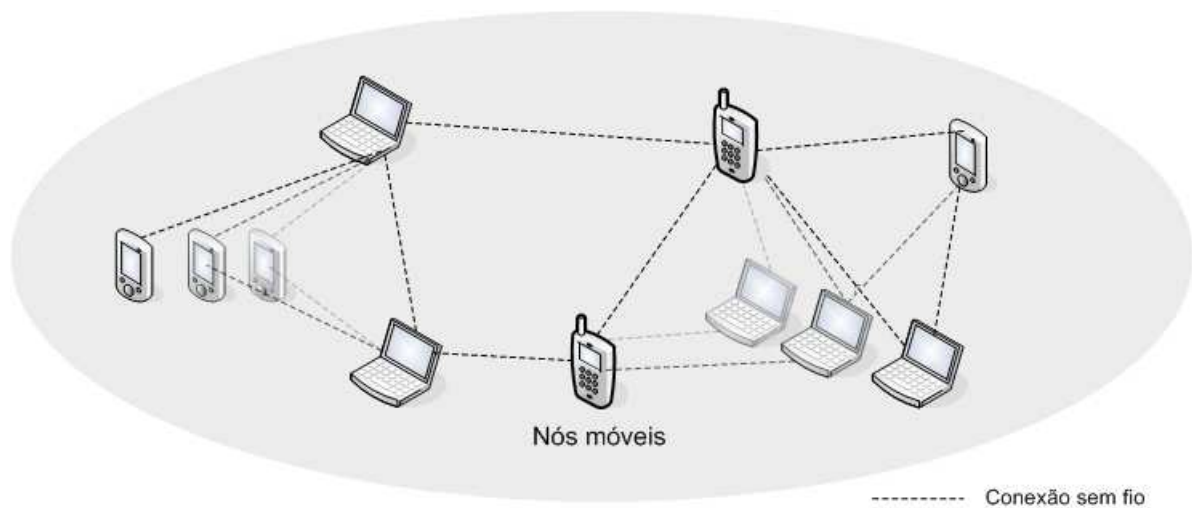
Os nós/roteadores podem se movimentar livremente, organizando-se em topologias arbitrárias, que podem mudar rápida e inesperadamente. A rede é auto-configurável e pode operar em modo independente (*standalone*) ou pode ser conectada à Internet.

Devido à mobilidade, os nós das MANETs apresentam restrições de consumo de energia. Outras características específicas das redes *ad hoc* móveis são que os nós possuem comumente uma única interface (rádio) para transmissão e recepção, e o tráfego de dados é feito entre qualquer par de nós. A Figura 2.3 ilustra a arquitetura básica de uma rede *ad hoc* móvel.

Com configuração simples e implantação rápida, as redes *ad hoc* são apropriadas para situações emergenciais de desastres, emergências médicas, conflitos militares, etc., e po-

³Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance

⁴Mobile Ad-hoc Network

Figura 2.3: Rede *ad hoc* móvel (MANET).

dem comportar centenas de usuários. As aplicações típicas incluem áreas em que não há infra-estrutura de comunicação ou a infra-estrutura existente está imprópria para uso, tais como nas seguintes situações: soldados e/ou tanques num campo de batalha, emergências após terremotos e furacões, executivos compartilhando informações numa conferência e jogadores com PDAs competindo entre si em um jogo multi-usuário.

A crescente disseminação do uso de dispositivos sem fio móveis, tais como *laptops*, *PDAs*, etc., incentivou o programa “*One laptop per child*” [35], que visa desenvolver um *laptop* barato para distribuição em massa nos países em desenvolvimento. O programa usará a tecnologia de redes *ad hoc* móveis nos *laptops* para prover sua própria rede de comunicação.

Enlace/Físico

Assim como as WLANs, as redes *ad hoc* móveis usam o mecanismo de CSMA/CA do protocolo de camada MAC IEEE 802.11 para coordenação de acesso ao meio sem fio. No entanto, devido à topologia multi-salto, é necessário um protocolo de roteamento para a comunicação entre os nós das MANETs.

Roteamento

Diferente das WLANs infra-estruturadas, onde os clientes sem fio se comunicam usando um único salto, as redes *ad hoc* móveis são redes com múltiplos saltos, onde os nós funcionam também como roteadores. A mobilidade dos nós gera uma rede com topologia

dinâmica e capacidade variável. É necessário descobrir os enlaces entre os nós móveis e encontrar caminhos através dos quais os nós (e os usuários) possam se comunicar.

Para enviar um pacote para outro nó na rede, cada nó participa de um protocolo de roteamento que permite descobrir o caminho até o nó destino, usando os nós intermediários como encaminhadores. Nos últimos anos, diversos protocolos de roteamento foram propostos para redes *ad hoc* móveis, considerando as características de mobilidade e consumo de energia dos nós. Apresentamos uma breve descrição dos principais protocolos no Capítulo 4.

A topologia das MANETs provê flexibilidade e auto-configuração. As WLANs infra-estruturadas fornecem maior capacidade e estabilidade da rede através de pontos de acesso fixos, ligados à rede cabeada. As redes *mesh* sem fio combinam as vantagens das arquiteturas *ad hoc* e infra-estruturada para prover escalabilidade e desempenho em redes sem fio de larga escala.

2.3 Redes *mesh* sem fio

Uma rede *mesh* sem fio (WMN⁵) é composta por dois tipos de nós - roteadores *mesh* e clientes *mesh* - onde os roteadores têm mobilidade mínima e formam o *backbone* da WMN. Conforme as funcionalidades dos nós, as WMNs podem ser classificadas em três tipos principais: infra-estruturada, cliente e híbrida [2], descritas a seguir.

WMN infra-estruturada. A WMN infra-estruturada compõe-se de roteadores *mesh* conectados entre si formando um *backbone* sem fio (*backhaul*) usado pelos clientes. Os roteadores *mesh* são estacionários e encaminham o tráfego de/para outros nós através de enlaces sem fio, com comunicação multi-salto. Os roteadores *mesh* funcionam também como pontos de acesso (AP), fornecendo acesso a clientes locais sem fio. Essa infra-estrutura provê conectividade com outras redes, tais como a Internet e outras redes sem fio (Wi-Fi, WiMAX, celular, etc.) através de funcionalidades de *gateway/bridge* em alguns roteadores *mesh*. A WMN infra-estruturada é o tipo mais usado atualmente e está representada na Figura 2.4. Para estender o alcance e acompanhar a crescente demanda por largura de banda, pontos de acesso podem ser adicionados na rede. O custo para prover uma conexão cabeada para cada roteador/AP é eliminado pelo uso de um *backbone* sem fio.

WMN cliente. A arquitetura *mesh* cliente possibilita a formação de redes sem fio *peer-to-peer* entre dispositivos clientes. Este modelo é conhecido como *ad hoc*, onde os próprios

⁵Wireless Mesh Network

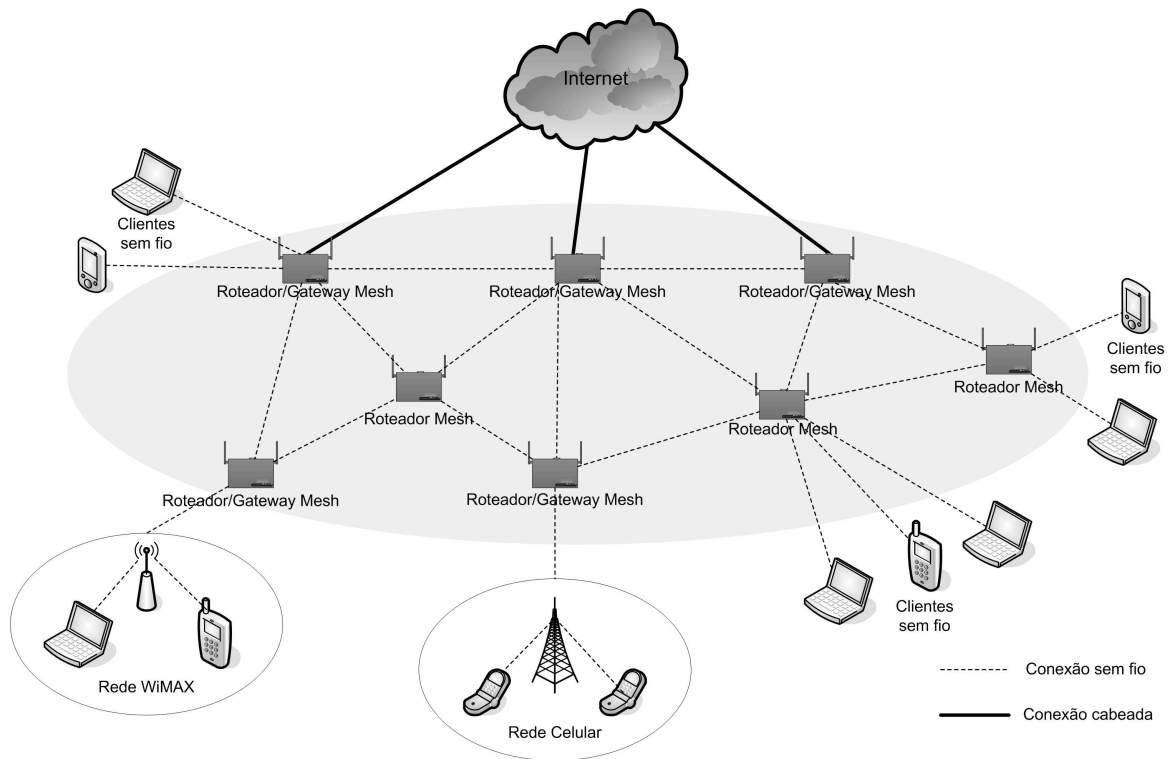
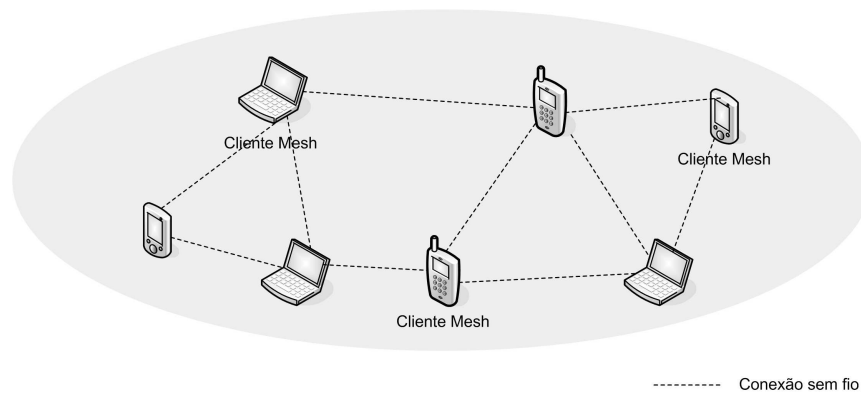
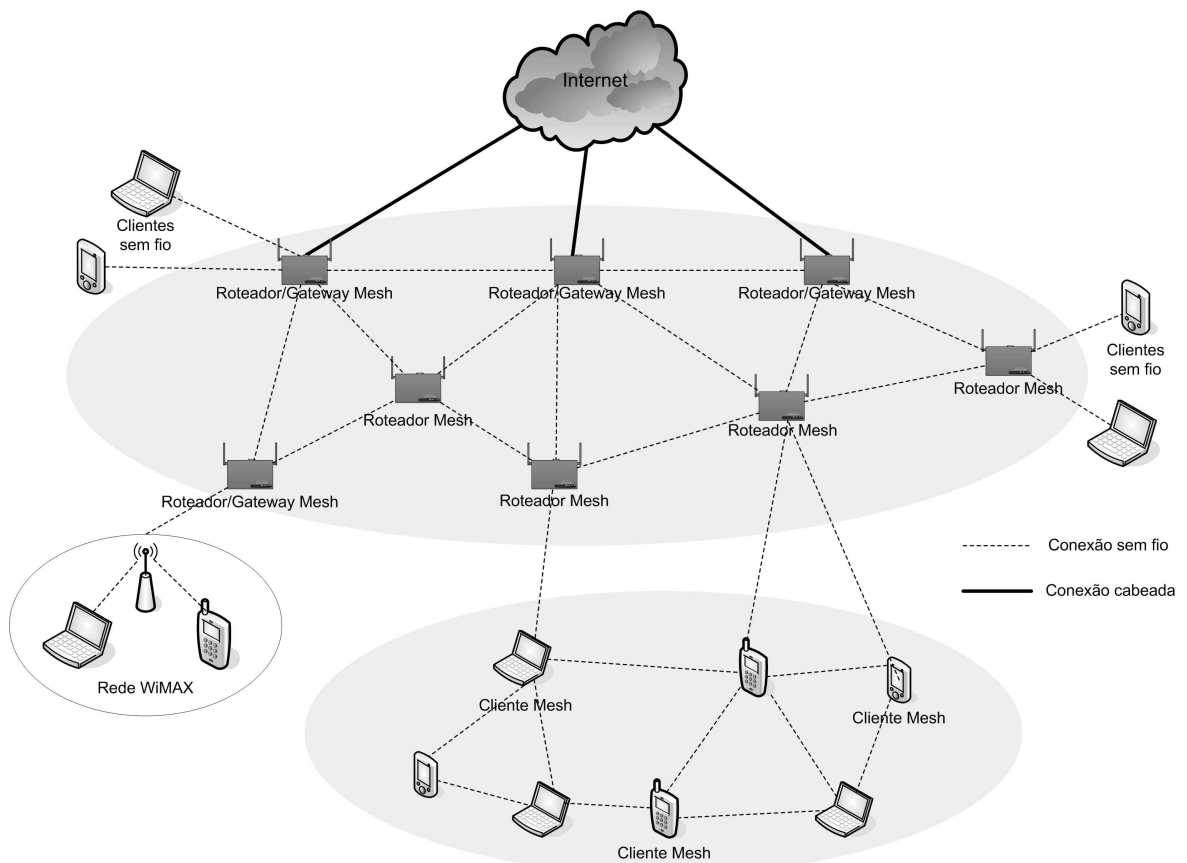


Figura 2.4: Rede *mesh* sem fio (WMN) infra-estruturada.

clientes formam a rede, dispensando o uso de qualquer infra-estrutura prévia. Cada nó funciona também como um roteador, encaminhando os pacotes por vários nós clientes até alcançarem o destino. Em geral, clientes *mesh* são nós móveis, como *laptops*, *PDA*s, *smartphones*, etc. A Figura 2.5 apresenta a arquitetura básica de uma WMN cliente.

WMN híbrida. A WMN híbrida suporta simultaneamente os modos infra-estruturado e cliente operando como uma única rede. Os nós clientes podem acessar a rede através de roteadores *mesh* ou via outros clientes *mesh*. A Figura 2.6 ilustra o modelo de WMN híbrida. As redes *mesh* híbridas combinam as funcionalidades das WMNs infra-estruturadas e clientes. A infra-estrutura provida pelos roteadores *mesh* aumenta o desempenho e possibilita a conectividade com outras redes. Por sua vez, a capacidade de roteamento dos nós clientes aumenta a cobertura dentro da rede. A combinação de ligações aumenta a robustez e a confiabilidade da rede [2].

As redes *mesh* sem fio compartilham algumas características das MANETs, como a topologia de múltiplos saltos e a capacidade de auto-organização/auto-configuração dos nós, simplificando a instalação e a gerência. No entanto, diferente das MANETs, nas WMNs infra-estruturadas existe um *backbone* sem fio que provê acesso aos clientes e

Figura 2.5: Rede *mesh* sem fio (WMN) cliente.Figura 2.6: Rede *mesh* sem fio (WMN) híbrida.

conectividade até as redes cabeadas. A topologia *mesh* permite estender a conectividade inclusive para pontos sem visada (NLOS⁶), através de nós intermediários. A combinação desses fatores torna as redes *mesh* sem fio facilmente escaláveis.

2.3.1 WLAN x MANET x WMN

Embora as WMNs combinem funcionalidades das WLANs infra-estruturadas e das MANETs, elas possuem características únicas que as diferenciam de outras redes sem fio. Da perspectiva de roteamento, as principais diferenças são [50]:

- Topologia da rede: nas WMNs, existe um *backbone* sem fio. Similar às MANETs, a comunicação é feita via transmissões sem fio com múltiplos saltos. Diferente das MANETs, a mobilidade dos nós/roteadores é rara, ou seja, a topologia é estática;
- Gerência: nas redes *mesh* sem fio, os nós são auto-configuráveis e auto-gerenciáveis, ao contrário das WLANs;
- Padrão de tráfego: nas WLANs, os dados são trocados entre clientes e APs. Nas MANETs, o tráfego pode fluir entre qualquer par de nós. Nas WMNs, a transmissão ocorre principalmente entre clientes e o(s) *gateway(s)* da rede;
- Interferência: as WMNs sofrem interferência entre fluxos e intra-fluxos. A comunicação entre dois nós pode afetar a transmissão de todos os nós vizinhos, levando aos problemas conhecidos de terminais escondidos e expostos [50]. A capacidade do enlace varia com o tempo devido à interferência nas comunicações;
- Energia: diferente das MANETs, os roteadores das WMNs não possuem restrições de consumo de energia;
- Diversidade de canais: sem restrições de custo e energia, os roteadores das WMNs podem usar múltiplos rádios, possibilitando maior diversidade de canais.

A partir das características específicas de cada arquitetura de rede sem fio, construímos uma tabela comparativa (Tabela 2.1) apresentando as semelhanças e diferenças entre WLANs, MANETs e WMNs.

⁶Non-line-of-sight

Tabela 2.1: Tabela comparativa das arquiteturas WLAN, MANET e WMN

Arquitetura	WLAN	MANET	WMN
Topologia	Infra-estruturada Salto único Estática	Ad hoc Múltiplos saltos Dinâmica	Infra-estruturada Múltiplos saltos Estática
Gerência	Centralizada	Auto-organização Auto-configuração	Auto-organização Auto-configuração
Padrão de tráfego	Entre clientes e AP	Entre qualquer par de nós	Tipicamente entre clientes e gateway(s)
Interferência	Entre-fluxos	Entre fluxos e intra-fluxos	Entre fluxos e intra-fluxos
Energia	APs não possuem restrições de consumo de energia	Nós possuem restrições de consumo de energia	Roteadores/APs não possuem restrições de consumo de energia
Diversidade de canais	Não (único rádio)	Não (único rádio)	Sim (múltiplos rádios)

2.3.2 Aplicações

As redes *mesh* sem fio provêem um *backbone* sem fio para novas aplicações e serviços. A seguir, comentamos alguns cenários de aplicação das WMNs, que incluem redes Wi-Fi de larga escala, redes de acesso banda larga, redes comunitárias e redes metropolitanas sem fio, entre outros.

As WMNs permitem estender a cobertura das redes locais sem fio (WLANs), criando redes Wi-Fi de larga escala (*hot zones*). Os roteadores/APs *mesh* integram as funções de acesso e *backhaul*, eliminando o custo de uma conexão Ethernet, ADSL⁷ ou E1 para cada roteador/AP. Apenas alguns APs precisam de conexão cabeada para permitir que toda a rede tenha acesso à Internet. Um caso típico de *hot zone* é a cobertura sem fio de um campus universitário (Figura 2.7), possibilitando o acesso sem fio aos alunos e docentes dentro da área do campus.

A demanda por acesso de banda larga sem fio vem crescendo continuamente e aumentará muito nos próximos anos. A implantação fácil e a topologia NLOS das WMNs permitem levar o acesso banda larga aos usuários na última milha (*last mile*), incluindo áreas rurais onde não há opção de conectividade. O lento avanço na tecnologia de telefo-

⁷Asymmetric Digital Subscriber Line

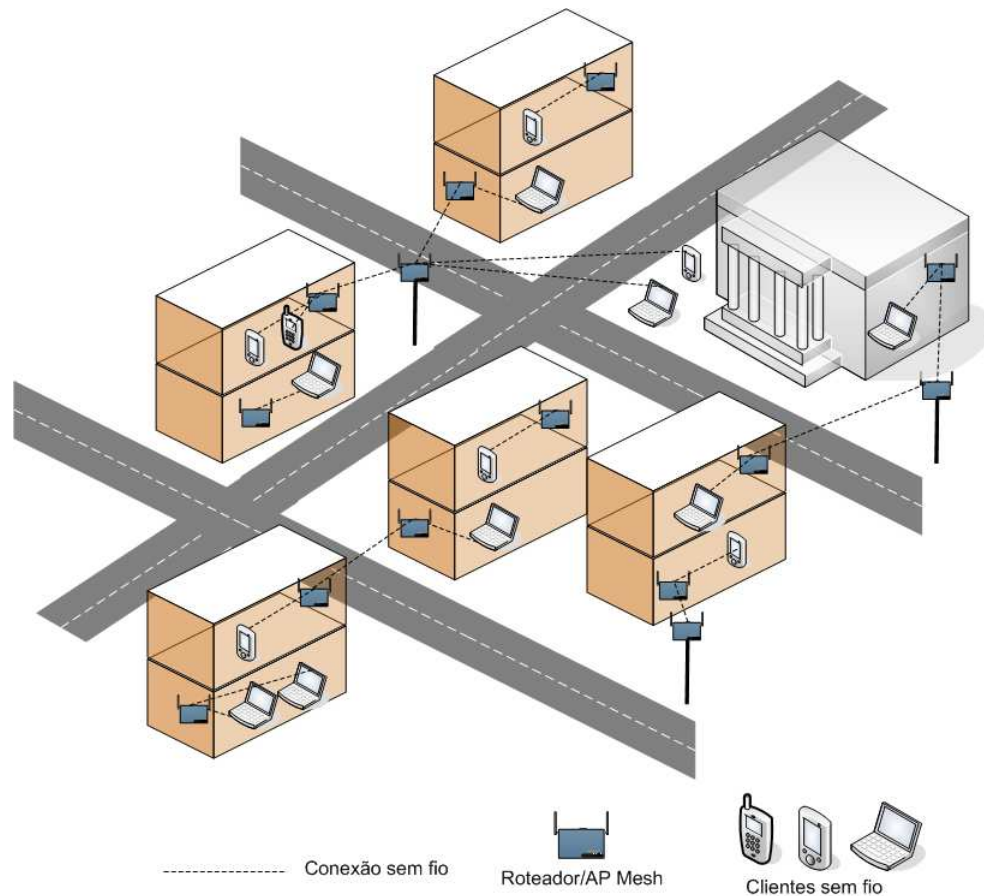


Figura 2.7: WMNs para rede de um campus universitário.

nia celular e o alto custo desses sistemas estão motivando o desenvolvimento de aparelhos celulares híbridos, como o iPhone® [4], que permitem fazer/receber ligações usando redes 802.11, através de aplicações VoIP⁸, além das redes celulares convencionais [49].

As redes comunitárias são outro cenário de aplicação das WMNs. Um exemplo de rede comunitária é uma moradia estudantil, composta de várias casas e/ou apartamentos distribuídos em ruas vizinhas. O modelo padrão de acesso é baseado em uma linha ADSL por casa para prover conexão à Internet, e um roteador sem fio ligado a essa linha, fornecendo acesso local. Neste modelo, uma grande porcentagem da área entre as casas não é coberta por serviços sem fio, existe apenas um caminho de comunicação em cada casa, e todo o tráfego é roteado até um *gateway* para a Internet. A arquitetura *mesh* permite interligar as casas através de roteadores sem fio, formando uma rede com caminhos redundantes (Figura 2.8). Essa rede provê maior cobertura sem fio e possibilita o compartilhamento de informações (arquivos de dados, *streaming* de vídeo, etc.) na

⁸Voice over IP

comunidade e/ou vizinhança.

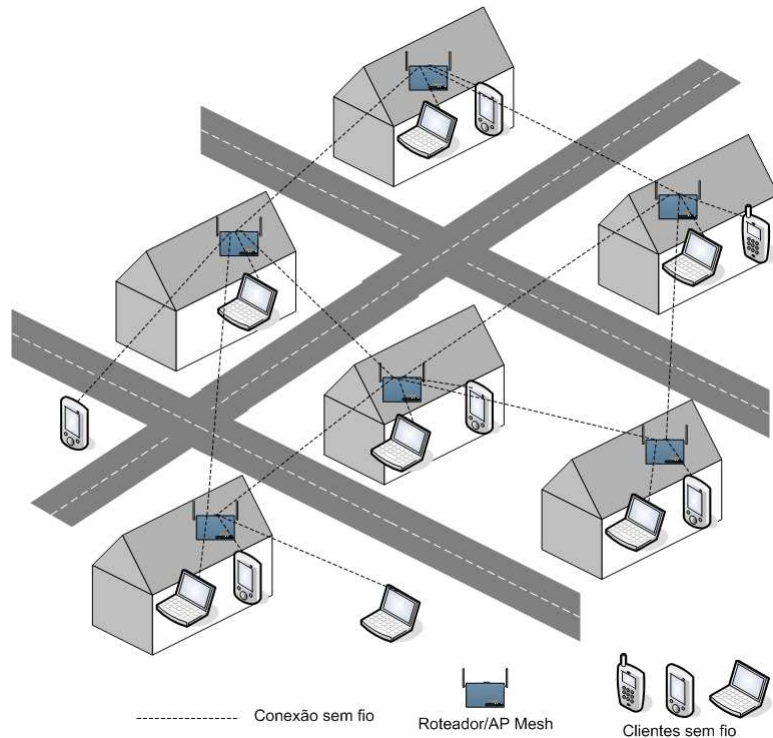


Figura 2.8: WMNs para redes comunitárias.

O uso de redes *mesh* em áreas metropolitanas é uma alternativa econômica comparada às redes cabeadas, especialmente em regiões em desenvolvimento. A topologia *mesh* permite estender a cobertura sem fio através de áreas de grande escala, tais como cidades (Figura 2.9). A rede deve estar preparada para suportar centenas de usuários fixos ou móveis e vazão alta. O tráfego é heterogêneo e pode incluir fluxos multimídia. Portanto, a escalabilidade é um fator extremamente crítico em WMNs metropolitanas.

Os cenários de aplicação das redes *mesh* sem fio são muito vastos e incluem uma grande diversidade de aplicações além das já citadas. As WMNs também podem ser usadas em sistemas de transporte (em vagões de trens, por exemplo), no controle de dispositivos elétricos em automação predial, na distribuição de informações de sistemas médicos e hospitalares e em sistemas de segurança, entre outros [2].

Qualidade de serviço (QoS) é crucial em vários cenários de aplicação das WMNs, tanto atuais quanto futuros [20]. A combinação da tecnologia sem fio e topologia *mesh* provê uma rede com alto grau de flexibilidade e redundância. A área de cobertura e a largura de banda podem ser ampliadas adicionando-se roteadores/APs na rede. As funções de auto-organização, auto-configuração e auto-gerência são intrínsecas às redes *mesh* sem fio. Entretanto, o acesso baseado em contenção do IEEE 802.11 ainda é um ponto fraco

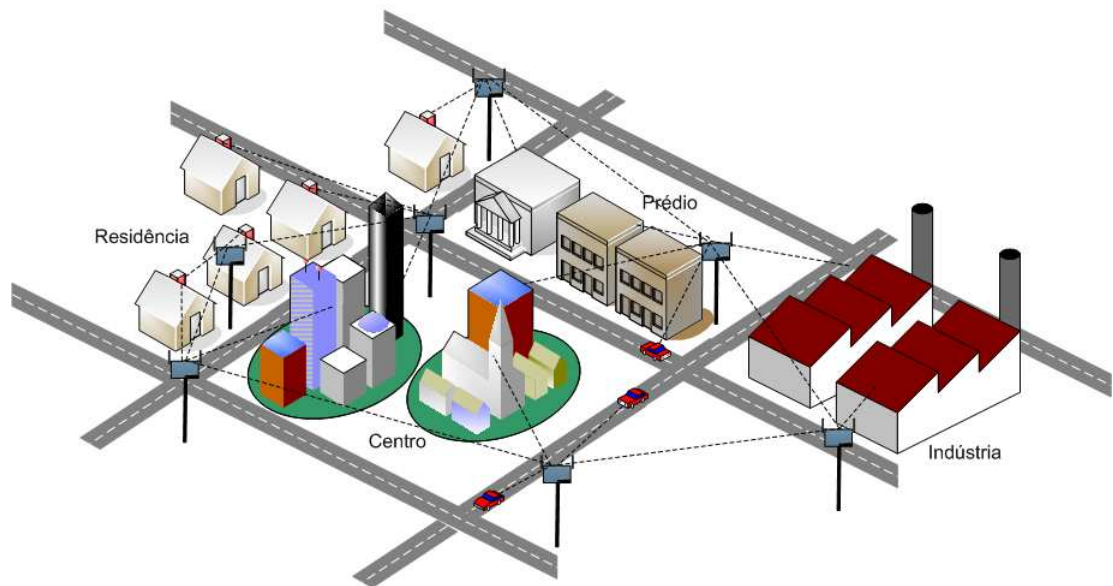


Figura 2.9: WMNs para redes metropolitanas.

para provisão de QoS em WMNs. Outro fator importante é o projeto do protocolo de roteamento.

Capítulo 3

MAC IEEE 802.11 e Roteamento

Neste capítulo, descrevemos de maneira sucinta as funcionalidades de camada MAC¹ do padrão IEEE 802.11 e os problemas de interferência em redes sem fio com múltiplos saltos. Também apresentamos alguns conceitos referentes ao roteamento em redes sem fio.

3.1 MAC IEEE 802.11

A comunicação na camada de enlace dos dispositivos sem fio é definida pela especificação MAC do IEEE 802.11. A subcamada MAC da família de padrões IEEE 802.11 foi desenvolvida para suportar a operação de redes locais sem fio (WLANs). Sua especificação inclui uma função de coordenação que determina quando um nó operando dentro de uma área determinada e limitada, conhecida como BSS², pode transmitir e receber dados através do meio sem fio, a fim de evitar colisões.

O MAC original do padrão IEEE 802.11 especifica dois modos de coordenação de acesso ao meio: DCF³, que é distribuído, e PCF⁴, centralizado e opcional. O modo DCF é baseado em CSMA/CA⁵, que é um mecanismo de acesso ao canal baseado em contenção, com detecção de portadora e contagem regressiva (*binary exponential backoff*). No CSMA/CA, um nó que deseja transmitir deve primeiro escutar o canal por um período pré-determinado de tempo a fim de verificar se existe alguma atividade no canal. Se o canal é detectado como ocioso (*idle*), o nó pode transmitir. Se o canal é detectado como ocupado (*busy*), o nó tem que adiar sua transmissão. No modo PCF, um nó central coordena o acesso ao meio através de uma consulta sequencial aos demais nós, método

¹Medium Access Control

²Basic Service Set

³Distributed Coordination Function

⁴Point Coordination Function

⁵Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance

conhecido como *polling*.

Nas redes multi-salto, cuja característica é descentralizada, é usada a função de ordenação distribuída baseada em contenção. No entanto, o mecanismo de CSMA/CA é baseado em compartilhamento do meio e transmissões com um único salto, resultando num aumento expressivo da taxa de interferência quando aplicado em redes com múltiplos saltos.

Para estabelecer melhorias no padrão 802.11 para suporte à qualidade de serviço, foi criado um subgrupo de trabalho do IEEE, denominado 802.11e [22]. Várias funcionalidades foram propostas na especificação, dentre as quais podemos destacar a introdução de modos adicionais de controle de acesso ao meio com contenção priorizada e a criação de classes de tráfego. No entanto, o 802.11e foi desenvolvido para redes com um único salto, não apresentando bom desempenho em redes multi-salto [49].

3.1.1 Interferência em redes sem fio multi-salto

Diferente das redes cabeadas, onde os enlaces podem ser usados simultaneamente, em redes sem fio enlaces vizinhos interferem entre si. Tipicamente, a área de interferência é maior que a área de transmissão. Em redes multi-saltos, a comunicação entre dois nós pode ser afetada não apenas por seus vizinhos, mas também pelos outros nós desconhecidos dentro da área de interferência [20]. A Figura 3.1 mostra uma representação simplificada desse fenômeno.

Na Figura 3.1, cada nó pode se comunicar com os demais nós dentro da sua área de transmissão. O nó A forma o Enlace 1 para se comunicar com o nó B e escuta o meio. Se estiver livre, o nó A inicia a transmissão. No entanto, o raio de interferência excede o de transmissão, implicando que os demais nós da figura permaneçam quietos durante sua transmissão. Se algum outro nó dentro do raio de interferência do nó A ou do nó B também transmitir dados, ocorre colisão. Portanto, apenas um desses enlaces interferentes pode estar ativo num dado momento, o que reduz a vazão disponível na rede a uma fração da vazão máxima do enlace [20].

Em redes sem fio com múltiplos saltos, o desempenho da rede é afetado por dois tipos de interferência: *interferência intra-fluxo*, gerada por nós adjacentes num mesmo caminho, e *interferência entre fluxos*, causada por nós de caminhos vizinhos [18]. A Figura 3.2 ilustra a interferência intra-fluxo ocorrida entre os nós A e B, onde ambos usam o mesmo canal de transmissão (Canal 1). Usando o nó D como intermediário (caminho A-D-C), evitamos a interferência intra-fluxo ao usar diferentes canais de transmissão (Canais 1 e 6). Na Figura 3.3, vemos um exemplo do problema de interferência entre fluxos, onde a transmissão simultânea dos nós D e E afeta os fluxos vizinhos A-D-C e E-F, reduzindo a vazão de ambos. Neste cenário, uma alternativa é usar o caminho A-B-C, que não gera

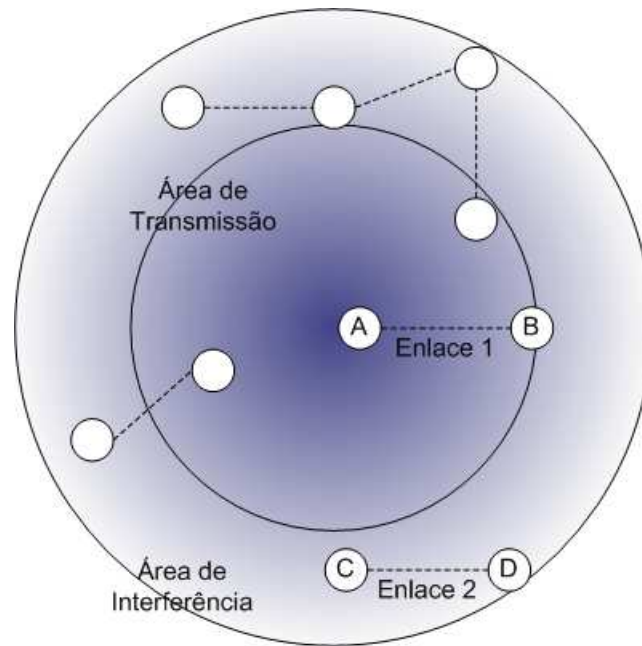


Figura 3.1: Efeito da interferência em redes sem fio multi-salto.

interferência entre fluxos, aumentando a capacidade da rede.

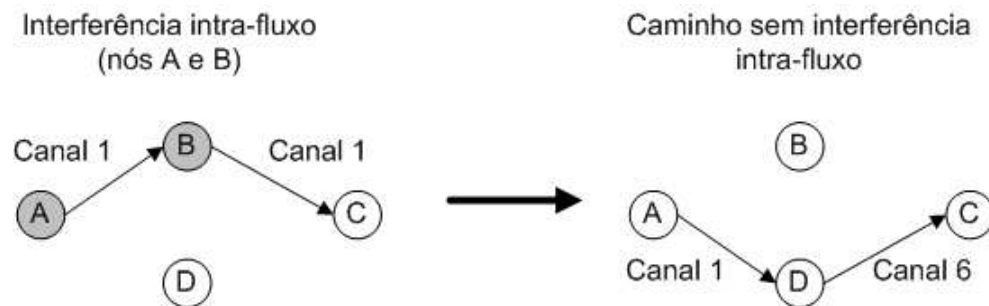


Figura 3.2: Interferência intra-fluxo.

Embora existam canais de frequência não interferentes disponíveis no padrão 802.11, a maioria das redes sem fio multi-salto usa a abordagem de único rádio e único canal. Nesse modelo, cada nó é equipado com uma única interface de rádio operando num canal de frequência compartilhado com os demais. Esse sistema apresenta baixa utilização de canal e desempenho fraco, pois um nó não consegue receber e transmitir ao mesmo tempo e existe contenção entre enlaces adjacentes. O uso de múltiplos rádios por nó tem se mostrado uma técnica promissora para minimizar a interferência em redes sem fio com múltiplos saltos.

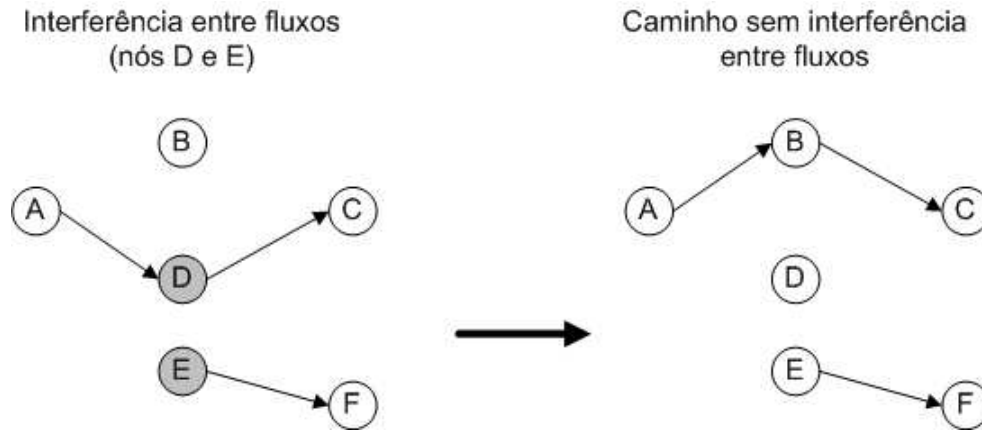


Figura 3.3: Interferência entre fluxos.

3.1.2 Múltiplos rádios e alocação de canais

A capacidade de uma rede sem fio é reduzida devido à interferência entre transmissões simultâneas [19]. O uso de múltiplos rádios por nó é uma estratégia eficaz para reduzir a interferência e aumentar a vazão em redes multi-salto. Na arquitetura multi-rádio, os nós possuem várias interfaces (rádios) que operam em canais diferentes, possibilitando transmissão e recepção simultâneas. A Figura 3.4 ilustra um exemplo de arquitetura multi-rádio, onde cada nó comunica-se com seus vizinhos usando canais distintos, quando possível.

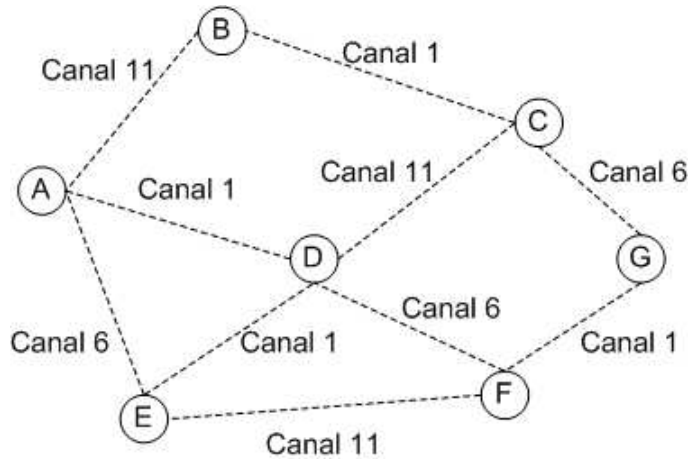


Figura 3.4: Arquitetura multi-rádio.

Para manter a conectividade na rede, é necessário que os nós vizinhos compartilhem um canal de comunicação. Para determinar a distribuição de canais entre os nós na rede, é necessário um mecanismo de alocação de canais. Segundo a definição de Kyasanur e

Vaidya [28], as estratégias de alocação de canais podem ser classificadas como:

- alocação estática: a interface (rádio) é fixa em um canal, ou seja, o canal é definido *a priori* e mantido por um longo período de tempo;
- alocação dinâmica: a interface comuta entre vários canais, conforme requisitos de tráfego. A troca de canais introduz um custo (atraso) de comutação;
- alocação híbrida: a interface receptora é fixada em um canal (alocação estática), enquanto a transmissora comuta entre os canais restantes (alocação dinâmica) conforme requisitos de tráfego.

A estratégia de alocação estática de canais é simples de implementar e não envolve comutação freqüente. Esta abordagem evita o atraso relacionado à comutação de canais, porém não é sensível a variações de tráfego.

A alocação dinâmica de canais requer um mecanismo de coordenação entre os nós para manter a conectividade na rede. Também implica em trocas constantes de canais para transmissão. Estes fatores tornam a implementação mais complexa e inserem um custo de comutação para a troca do canal de transmissão. Mudanças de rota envolvem comutação de canais nos roteadores. O atraso de comutação afeta o desempenho da rede, pois aumenta o custo de um *broadcast*, além de incrementar o atraso fim-a-fim de um fluxo se a rota selecionada requer comutação de canal em algum nó ao longo do fluxo. Além disso, a alocação dinâmica requer a habilidade de comutação freqüente de canais, funcionalidade não encontrada nos equipamentos oferecidos pelo mercado atualmente.

A arquitetura multi-rádio introduz desafios de pesquisa em várias áreas, incluindo alocação de canais, coordenação entre vizinhos e roteamento.

3.2 Roteamento

Roteamento envolve determinar o caminho fim-a-fim entre um nó origem e um nó destino, usando nós intermediários [50]. Os protocolos de roteamento para redes sem fio podem ser classificados em duas famílias principais: *protocolos pró-ativos ou de estado de enlace*, e *protocolos reativos ou sob-demanda* [10]. Nos protocolos pró-ativos, os caminhos são estabelecidos *a priori*, ou seja, independentemente da necessidade de um nó transmitir dados. Nos protocolos reativos, os processos de roteamento são iniciados a partir de requisições [50].

Um protocolo de roteamento de estado do enlace é composto por quatro componentes [15]:

- Componente para descoberta dos vizinhos de um nó;

- Componente que define pesos para os enlaces entre um nó e seus vizinhos;
- Componente para propagar essa informação para os demais nós na rede;
- Componente que usa os pesos dos enlaces para selecionar um caminho para um determinado destino. Os pesos dos enlaces são combinados formando uma métrica do caminho.

Os protocolos pró-ativos ou de estado de enlace baseiam-se em mensagens de *hello* trocadas entre os nós para divulgar e manter a topologia da rede. Cada nó armazena informações sobre o estado dos enlaces e a topologia da rede, que são utilizadas para selecionar os caminhos. Após selecionados, os caminhos (ou rotas) são mantidos numa tabela de roteamento. Dessa forma, as rotas para qualquer destino ficam imediatamente disponíveis, evitando o atraso para a descoberta de rotas. Porém, mudanças na topologia da rede disparam atualizações, gerando *overhead* de controle. Em ambientes com suporte à mobilidade, como as redes *ad-hoc* móveis (MANETs), a topologia da rede é instável e requer mensagens de atualização freqüentes. Nestes ambientes, os protocolos pró-ativos podem gerar maior *overhead* de pacotes de roteamento na rede, além de lentidão na disseminação de quedas de enlaces [10].

Nos protocolos reativos, as rotas são estabelecidas sob-demanda, tipicamente através de mensagens de requisição de rota (RREQ⁶) e resposta de rota (RREP⁷). Os nós não precisam manter informações sobre a topologia da rede, minimizando o *overhead*. Porém, como os caminhos são definidos reativamente, estes protocolos podem apresentar atraso no descobrimento de rotas em redes com muitos nós. Outra desvantagem dos protocolos reativos é que eles dependem de informações da camada inferior para detectar a quebra de enlaces.

Alguns protocolos apresentam uma abordagem híbrida, em que alguns nós podem implementar um protocolo de roteamento pró-ativo enquanto outros usam um protocolo reativo.

3.2.1 Métricas de roteamento

Para determinar a melhor rota entre um par de nós, o protocolo de roteamento usa um valor como métrica de roteamento. Este valor pode ser a contagem de saltos, a largura de banda, o atraso, etc. no caminho entre os nós.

A métrica de contagem de saltos (*hop count*) é a mais comum nos protocolos de roteamento existentes para redes sem fio. Essa métrica encontra o menor caminho (*shortest path*) entre os nós origem e destino através da contagem do número de saltos. É uma

⁶Route Request

⁷Route Reply

métrica simples, fácil de calcular e não requer medições adicionais. No entanto, a contagem de saltos não considera as diferenças de taxas de transmissão e perda de pacotes entre os enlaces, nem interferências na rede. Tende a selecionar enlaces mais longos, geralmente com maior taxa de perda de pacotes [53].

Nos últimos anos, outras métricas de roteamento para redes sem fio foram propostas, tais como ETX (*Expected Transmission Count*) [13], WCETT (*Weighted Cumulative Expected Transmission Time*) [15] e iAWARE (*interference Aware*) [47]. Essas métricas buscam capturar a qualidade dos enlaces e/ou interferências na rede, e inseri-las no processo de roteamento. As principais métricas propostas são apresentadas com detalhes no Capítulo 4, entre os trabalhos relacionados.

As métricas de roteamento podem ser usadas para encontrar caminhos com peso mínimo (*minimum weight*). Para cada enlace, é estipulado um peso associado. A combinação dos pesos dos enlaces de um caminho pode formar uma métrica do caminho. As métricas podem ser cumulativas (somatório da métrica dos enlaces de um caminho) ou multiplicativas (multiplicação da métrica dos enlaces do caminho).

Usando os algoritmos de Bellman-Ford e Dijkstra, é possível encontrar, em tempo polinomial, caminhos com peso mínimo usando uma métrica de roteamento isotônica, como por exemplo, a largura de banda.

3.2.2 Isotonicidade

Isotonicidade é uma propriedade necessária aos protocolos de roteamento de estado de enlace para encontrar caminhos livres de *loop* (*loop-free*) e com peso mínimo. Resumidamente, isotonicidade significa que uma métrica deve garantir que a diferença do valor acumulativo dos pesos (*order of the weights*) de dois caminhos é preservada se eles são estendidos ou precedidos por um terceiro caminho comum [53].

Assuma que para qualquer caminho a , seu peso é definido por uma métrica de roteamento que é função de a , denotada por $P(a)$. Denotando a concatenação de dois caminhos a e b como $a + b$, a definição de isotonicidade é:

Definição 1: uma métrica P é isotônica se $P(a) \leq P(b)$ implica em $P(a + c) \leq P(b + c)$ e $P(c' + a) \leq P(c' + b)$ para todo a, b, c, c' (Ver Figura 3.5).

A relação entre a propriedade de isotonicidade e a otimalidade dos algoritmos de Bellman-Ford e Dijkstra é apresentada por Sobrinho [46], que define:

Teorema 1: isotonicidade é uma condição suficiente e necessária para os algoritmos de Bellman-Ford e Dijkstra encontrarem caminhos com peso mínimo.

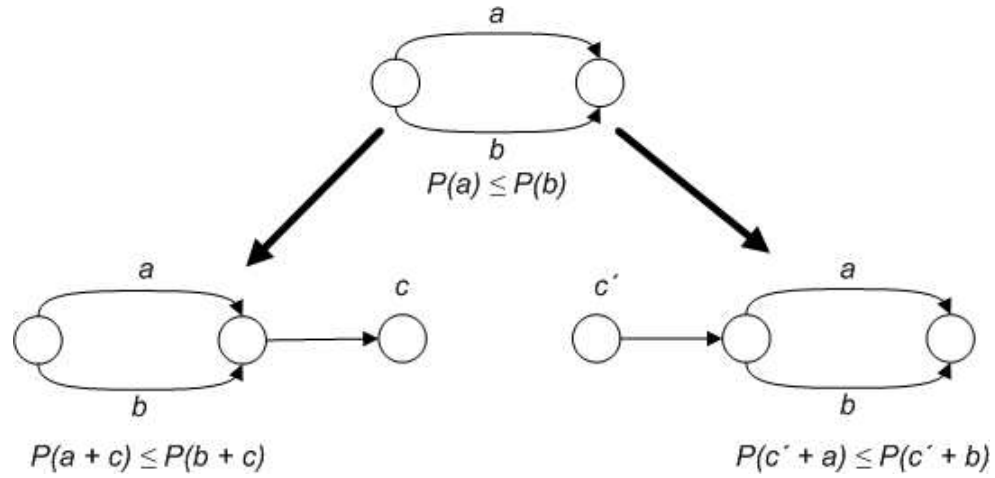


Figura 3.5: Exemplo de isotonicidade.

O Teorema 1 implica que se uma métrica de roteamento não é isotônica, protocolos de roteamento baseados nos algoritmos de Bellman-Ford ou Dijkstra podem não encontrar caminhos com peso mínimo entre dois nós. Os caminhos sub-ótimos resultantes podem degradar o desempenho da rede. Portanto, métricas de roteamento devem ser isotônicas ou passíveis de transformação para alguma forma isotônica para garantir um bom desempenho da rede [47]. Entretanto, protocolos de roteamento sob-demanda baseados no algoritmo de Bellman-Ford podem usar métricas não isotônicas para encontrar caminhos eficientes [47].

Capítulo 4

Trabalhos relacionados

Neste capítulo, apresentamos os principais trabalhos relacionados a roteamento e alocação de canais em redes *ad hoc* móveis e redes *mesh* sem fio.

4.1 Roteamento em redes *ad hoc* móveis (MANETs)

O roteamento em redes *ad-hoc* móveis vem sendo uma forte área de pesquisa há anos, motivada por ambientes de aplicações móveis, tais como redes para campos de batalha. Diversos protocolos de roteamento reativos e pró-ativos foram propostos para redes *ad-hoc*, sendo que a maioria usa a contagem de saltos (*hop count*) como métrica de roteamento. Os protocolos reativos mais representativos são o AODV (*Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing*) [41] e o DSR (*Dynamic Source Routing*) [27]. No roteamento pró-ativo, podemos destacar os protocolos TBRPF (*Topology Broadcast Based on Reverse-Path Forwarding*) [34], OLSR (*Optimized Link State Routing*) [12] e LQSR (*Link Quality Source Routing*) [14]. A seguir, comentamos resumidamente cada um deles.

O protocolo AODV (*Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing*) [41] implementa um mecanismo de descobrimento de caminho no qual um nó envia um pacote *broadcast* de requisição de rota (RREQ¹) para os seus vizinhos, que repassam-no até o nó destino. Ao encaminhar um pacote RREQ, o nó intermediário guarda em sua tabela de rotas o endereço do vizinho através do qual ele recebeu a primeira cópia do pacote, estabelecendo um caminho inverso (requer enlaces simétricos). Também implementa um esquema de manutenção de rotas quando o nó origem ou intermediário do caminho se move.

No DSR (*Dynamic Source Routing*) [27], os nós mantêm uma *cache* de rotas que permite armazenar várias rotas para um mesmo destino. O descobrimento de rotas é feito através de *broadcast* de um pacote de requisição de rota. Ao receber o pacote, cada

¹Route Request

nó consulta sua *cache* de rotas; se ele não tem uma rota para o endereço destino, o nó adiciona seu próprio endereço no registro de rotas do pacote e o repassa. Quando chega ao seu destino, o pacote contém a sequência de nós percorridos. Para enviar o pacote de resposta de rota, o caminho utilizado é determinado primeiramente por uma consulta à *cache* de rotas, depois pela sequência de nós se os enlaces são simétricos; senão, o nó inicia um processo de descobrimento de rotas. Assim como o AODV, o protocolo DSR é reativo e encontra o menor caminho (*shortest-path*) entre um par de nós.

Representante dos protocolos pró-ativos, o TBRPF (*Topology Broadcast Based on Reverse-Path Forwarding*) [34] consiste de dois módulos: descobrimento de vizinhos e roteamento (que realiza descobrimento da topologia e cálculo da rota). O descobrimento dos nós vizinhos é feito através de mensagens de *hello* diferenciais, que reportam apenas mudanças de estado dos vizinhos. Cada nó rodando TBRPF calcula uma árvore enraizada (com caminhos a todos os nós alcançáveis) com base em informações parciais de topologia da rede armazenadas em sua tabela. Para minimizar o *overhead*, cada nó divulga aos vizinhos apenas uma parte da sua árvore enraizada. O TBRPF utiliza uma combinação de *updates* periódicos e diferenciais para manter todos os vizinhos informados da parte de sua árvore.

O protocolo OLSR (*Optimized Link State Routing*) [12] utiliza o conceito de nós de *relay* (MPRs²) para repassar as mensagens *broadcast* durante o processo de inundação, minimizando o *overhead*. Cada nó mantém uma tabela de roteamento baseada nas informações de estado dos vizinhos e da topologia parcial divulgada pelos MPRs. O OLSR é detalhado no Capítulo 5, pois é a base de nosso trabalho.

Proposto por Draves et al. [14], o LQSR (*Link-Quality Source Routing*) é um protocolo *source-routed* derivado do DSR, com suporte a métricas de qualidade do enlace. Os nós mantêm uma *cache* de estado dos enlaces. Cada nó inclui no pacote de descoberta de rota (*Route Request*) a métrica do enlace por onde ele recebeu o pacote. Ocasionalmente, cada nó envia uma mensagem com informações do enlace, contendo a métrica atual de cada enlace do caminho. As informações são propagadas pela rede junto com a mensagem de resposta de rota (*Route Reply*). O protocolo foi implementado como um *driver* de camada 2.5, ou seja, entre as camadas 2 e 3 da pilha TCP/IP³.

O projeto *Mobile Mesh* [31] apresenta um conjunto de protocolos para redes *ad-hoc*, incluindo protocolos de descobrimento de enlaces (MMLDP⁴), roteamento (MMRP⁵) e descobrimento de borda (MMBDP⁶), que encontra caminhos com peso mínimo usando

²Multipoint Relays

³Transmission Control Protocol/Internet Protocol

⁴Mobile Mesh Link Discovery Protocol

⁵Mobile Mesh Routing Protocol

⁶Mobile Mesh Border Discovery Protocol

roteamento pró-ativo. No MMRP, os nós difundem pacotes de estado do enlace (LSP⁷), contendo o ID do roteador e uma lista com os endereços das interfaces vizinhas e os respectivos pesos dos enlaces. O protocolo prevê divulgação de rotas externas, permitindo que os roteadores que estão conectados via cabo a uma rede fixa propaguem uma rota padrão (*default*) para os nós móveis. O protocolo usa uma técnica chamada *fish-eye routing* para melhorar a escalabilidade, fazendo com que a frequência de propagação dos pacotes LSP diminua em função da distância da origem.

Variações de protocolos pró-ativos e reativos para MANETs com suporte a QoS foram propostos, como o QOLSR [6] e o AODV com QoS [40]. O protocolo QOLSR (*Quality of Service for Ad hoc Optimized Link State Routing*) [6] é uma extensão do OLSR que apresenta modificações nas mensagens de controle, na heurística para seleção de nós MPRs e no algoritmo de roteamento a fim de obter QoS fim-a-fim com diferentes métricas de QoS.

A maioria dos protocolos de roteamento propostos para MANETs usa a contagem de saltos (*hop count*) como métrica de roteamento. Embora simples de computar, a contagem de saltos não considera as diferenças de taxas de transmissão e perda de pacotes entre os enlaces. Buscando refletir a qualidade dos enlaces, Couto et al. [13] apresentam uma métrica chamada ETX (*Expected Transmission Count*) definida como o número esperado de transmissões em camada MAC necessárias para enviar um pacote com sucesso através de um enlace. A métrica ETX é baseada na probabilidade de perda de pacotes entre pares de nós vizinhos, estimada através da difusão periódica de pacotes de sondagem (*probe*) do enlace. Cada nó calcula o número de pacotes de sondagem perdidos nos enlaces com seus vizinhos. A métrica ETX é uma métrica cumulativa, onde o peso de um caminho é definido pela soma dos valores de ETX dos enlaces do caminho, ou seja, das probabilidades de perda de pacotes de cada enlace do caminho. ETX é uma métrica isotônica, o que garante a computação eficiente de caminhos com peso mínimo (no caso, menor valor ETX) e roteamento livre de *loop* sob todos os protocolos de roteamento [53]. Como os pacotes de sondagem são pequenos e são enviados em intervalos muito esparsos (geralmente 1 segundo), eles podem não experimentar a mesma taxa de perda dos pacotes de dados enviados em taxas maiores. Portanto, a métrica não reflete diretamente a carga do enlace nem considera a taxa de transmissão dos enlaces.

As métricas e os protocolos de roteamento citados, incluindo aqueles com suporte a QoS, foram desenvolvidos para redes *ad-hoc* móveis, onde tipicamente os nós possuem um único rádio. Portanto, eles não exploram a diversidade de canais e apresentam vazão baixa da rede. Com enfoque no uso mais eficiente do espectro 802.11, trabalhos recentes tratam os problemas de roteamento e alocação de canais em redes sem fio com arquitetura multi-rádio.

⁷Link State Packet

4.2 Alocação de canais e roteamento em MANETs multi-rádio

Kyasanur e Vaidya [28] apresentam um esquema híbrido para alocação de canais em MANETs, onde a interface receptora é fixada em um canal (alocação estática), enquanto as transmissoras comutam entre os canais restantes (alocação dinâmica), conforme requisitos do tráfego. Em [29], os mesmos autores introduzem um protocolo de camada de enlace para gerência de alocação de canais e uma métrica de roteamento chamada MCR (*Multi-channel Routing*), que incorpora o custo de comutação de canal à métrica WCETT [15]. O trabalho avalia a métrica proposta com uma variação do protocolo DSR [27].

Em [43], Qu et al. propõem o uso de uma interface (rádio) dedicada exclusivamente para controle e roteamento configurada num canal fixo comum, além de duas interfaces para dados com alocação híbrida conforme [28]. O trabalho apresenta uma extensão do protocolo de roteamento OLSR que integra um algoritmo de alocação de canal para a interface de recepção baseado na topologia da rede.

Outra variação do protocolo OLSR com alocação de canais, chamada CA-OLSR (*Channel Assignment OLSR*), é apresentada em [18]. A proposta incorpora um novo protocolo MAC multi-canal ao protocolo OLSR, assumindo uma abordagem *cross-layer*. O protocolo é comparado com outros protocolos de alocação de canais através de simulações. Assim como em [43], o trabalho requer uma interface dedicada para as mensagens de controle e foi desenvolvido para MANETs.

4.3 Alocação de canais e roteamento em WMNs multi-rádio

O interesse por redes *mesh* sem fio introduziu a demanda por protocolos de roteamento dedicados para essa arquitetura, tanto para WMNs híbridas quanto infra-estruturadas. O protocolo WMR (*Wireless Mesh Routing*), proposto em [52], foi um estudo pioneiro em roteamento com suporte a QoS para redes *mesh* híbridas. O WMR usa pacotes de requisição e resposta de rotas para descoberta de caminhos, além de pacotes de *hello* enviados periodicamente entre os nós indicando o estado dos enlaces. Cada nó I mantém uma tabela de nós vizinhos $N[I]$ e distância $D(I)$ indicando o número de saltos até o AP mais próximo. O protocolo implementa algoritmos distintos de descobrimento de rotas, utilizando distância $D(I)$ para tráfego externo e *flooding* internamente. A garantia de QoS é feita através de controle de admissão e reserva temporária de banda. Cada nó deve computar a banda disponível e a consumida, levando em consideração as interferências dos nós vizinhos. O trabalho foi desenvolvido para WMNs com um único rádio.

Pesquisas recentes [3, 44] tratam a alocação de canais e o roteamento em redes *mesh* com múltiplos rádios. Alicherry et al. [3] apresentam uma formulação matemática para o problema *NP-Completo* de alocação de canais e roteamento integrados em WMNs multi-rádio, considerando as restrições de interferência, o número de canais na rede e o número de rádios disponíveis em cada roteador *mesh*. Também propõem um algoritmo de aproximação (*constant approximation algorithm*) visando otimizar a vazão da rede.

Raniwala e Chiueh [44] propõem algoritmos distribuídos de alocação de canais e roteamento para WMNs multi-rádio. Os algoritmos usam informações de topologia e estimativas de carga local por canal para seleção de rotas e (re)alocação dinâmica de canais. A descoberta de vizinhos é feita através de *broadcast* de mensagens de *hello*. O estabelecimento de rotas é feito através de mensagens de descoberta/atualização de rotas entre os nós da WMN e o *gateway* correspondente na árvore. A arquitetura proposta (denominada *Hyacinth*) requer a representação da rede em estrutura de árvores independentes enraizadas nos nós *gateways*. Os algoritmos são heurísticos e o limite inferior de desempenho não é conhecido.

Em [5], Avallone e Akyildiz identificam alguns problemas nos mecanismos de alocação de canais propostos em outros trabalhos, tal como a reação em cadeia quando o canal de um nó é trocado. Então, apontam alguns requisitos chave e desenvolvem um algoritmo centralizado de alocação de canais para WMNs multi-rádio, visando maximizar a vazão da rede. O algoritmo, chamado MCCA (*Maxflow-based Centralized Channel Assignment*), usa grafos dirigidos para selecionar os enlaces mais críticos para o transporte de dados, a partir da computação da capacidade dos enlaces e da topologia da rede. Então, particiona os enlaces em grupos e atribui os canais por grupos, visando minimizar a interferência nos enlaces mais críticos. O algoritmo MCCA é centralizado e a complexidade apresentada é de $O(mn^2)$, onde n é o número de nós e m é o número de enlaces da rede.

Com o enfoque nas redes comunitárias, onde os nós são estacionários, Draves et al. [15] propõem um protocolo de roteamento para WMNs multi-rádio denominado MR-LQSR (*Multi-radio LQSR*). O protocolo é uma extensão do protocolo LQSR [14] desenvolvido para MANETs, incluindo suporte a múltiplos rádios e uma métrica de roteamento chamada WCETT (*Weighted Cumulative ETT*). A métrica proposta estipula pesos para os enlaces baseado no tempo esperado de transmissão (ETT⁸) de um pacote através do enlace. ETT é uma função da taxa de perda de pacotes e da largura de banda de um enlace, e estende a métrica ETX ao considerar a taxa de transmissão dos enlaces. A métrica WCETT combina a soma de ETT de cada enlace e o número de enlaces com canais repetidos num caminho, a fim de selecionar rotas com maior diversidade de canais e maior vazão. A métrica WCETT é uma métrica cumulativa que visa reduzir a interferência intra-fluxo minimizando o número de nós no caminho que transmitem no mesmo canal.

⁸Expected Transmission Time

Porém, ela não captura a interferência entre fluxos. Além disso, a não isotonicidade da métrica WCETT a torna imprópria para uso em protocolos de roteamento de estado do enlace.

A métrica MIC (*Metric of Interference and Channel Switching*), proposta em [53], estende a métrica WCETT incorporando interferência entre fluxos. Ela possui dois componentes: IRU (*Interference-aware Resource Usage*) e CSC (*Channel Switching Cost*). IRU é o tempo de canal agregado dos nós vizinhos consumido por transmissões em um enlace. IRU é baseado na métrica ETT e captura a interferência entre fluxos, pois favorece caminhos que consomem menos tempo de canal nos nós vizinhos. O componente CSC mede o número de enlaces consecutivos que usam o mesmo canal, o que captura a interferência intra-fluxo e favorece caminhos com maior diversidade de canais. A métrica MIC é essencialmente não isotônica, portanto, para garantir roteamento livre de *loops*, ela pode ser usada apenas em protocolos de roteamento sob demanda.

Em [45], os autores propõem uma variação da métrica MIC denominada ILA (*Interference-Load Aware*). ILA é formada por dois componentes: MTI (*Metric of Traffic Interference*) e CSC (*Channel Switching Cost*). CSC é o mesmo da métrica MIC. O componente MTI considera a carga de tráfego dos vizinhos interferentes ao invés do número de vizinhos interferentes da métrica MIC, considerando que o grau de interferência depende da carga gerada e não da quantidade de nós interferentes. Assim como MIC, a métrica ILA é cumulativa e trata interferência intra-fluxo e entre fluxos; porém também não possui isotonicidade, pois usa a métrica ETT em sua formação. Os autores incorporaram a métrica ao protocolo AODV em WMNs multi-rádio.

Subramanian et al. [47] apresentam a métrica iAWARE (*interference Aware*), que combina cumulativamente a métrica ETT e uma taxa de interferência IR (*Interference Ratio*) baseada no SINR⁹ de cada enlace ao longo de um caminho. A métrica iAWARE busca capturar os efeitos da variação de taxa de perda dos enlaces, diferenças na taxa de transmissão, e interferências intra-fluxo e entre fluxos. Como a métrica WCETT compõe a iAWARE, esta última também não é isotônica. No trabalho, ela é usada num protocolo de roteamento sob demanda derivado do AODV e com suporte multi-rádio, chamado AODV-MR (*Multi-radio AODV*). A alocação de canais adotada é estática e externa ao protocolo de roteamento.

Em [48], encontramos uma proposta de algoritmo de roteamento com QoS para WMNs multi-rádio. Para a seleção de rotas, o algoritmo requer o cálculo da capacidade de banda disponível de todos os enlaces intermediários, o que envolve contabilizar e atualizar todos os fluxos dos nós em questão. A conexão só é admitida se existir algum caminho cuja capacidade atenda aos requisitos de banda especificados; caso contrário, o fluxo é bloqueado. O algoritmo é centralizado e baseado na solução de programação linear. O

⁹Signal to Interference plus Noise Ratio

estudo adota a alocação estática de canais e assume um modelo de tráfego aleatório entre qualquer par de nós.

A padronização de redes *mesh* 802.11 (*WLAN mesh*) está sendo desenvolvida pelo grupo IEEE 802.11s [23]. O trabalho, conhecido como *Extended Service Set (ESS) Mesh Networking*, visa definir um protocolo para camadas MAC e física que suporte entrega *broadcast/multicast* e *unicast* em topologias multi-salto auto-configuráveis. A especificação deve adicionar funções para descobrimento de topologia, seleção de rotas e alocação de canais, entre outras. O grupo propôs uma métrica de roteamento padrão chamada *airtime link metric*, que é *radio-aware* e mede a quantidade de recursos do canal consumida para transmitir um quadro através de um determinado enlace sem fio [7]. A proposta também especifica um protocolo de roteamento padrão denominado HWMP (*Hybrid Wireless Mesh Protocol*) e um protocolo opcional chamado RA-OLSR (*Radio-Aware OLSR*). O protocolo HWMP combina roteamento sob demanda e roteamento pró-ativo e é baseado no protocolo RM-AODV (*Radio Metric AODV*). RA-OLSR é um protocolo de roteamento pró-ativo baseado no OLSR que usa a métrica de *airtime* na seleção de MPRs. Ambos os protocolos RM-AODV e RA-OLSR trabalham em camada 2 com endereços MAC e usam métrica de roteamento *radio-aware* cumulativa na seleção de rotas. O trabalho é dirigido para redes *mesh* com até 32 nós encaminhadores. O futuro padrão deve ser compatível com os padrões existentes, tais como os protocolos 802.11a/b/g para transmissão sem fio e 802.11e [22] para QoS. O padrão IEEE 802.11s deverá suportar dispositivos com um ou múltiplos rádios. A versão ratificada está prevista para o início de 2008.

A abordagem da maioria dos algoritmos de roteamento propostos para MANETs e WMNs multi-rádio [29, 15, 47, 48] envolve calcular, em cada nó, a capacidade de banda disponível, o tempo de transmissão, a carga por canal, entre outros, disseminar essas informações pela rede, e combiná-las (cumulativa ou multiplicativamente) para encontrar um caminho ótimo. Em redes sem fio, essas medidas são difíceis de estimar corretamente e mudam frequentemente devido a variações de tráfego e interferências. Estes fatores comprometem a computação prática dessas métricas. Além disso, cada variação nas métricas precisa ser difundida pela rede e pode implicar em reconstrução de rotas. Isto gera *overhead* de controle do protocolo e instabilidade no roteamento. Portanto, essa abordagem pode ser pouco escalável, dependendo da imprevisibilidade do tráfego.

Dentre as métricas de roteamento apresentadas, apenas ETX [13] é isotônica, porém não captura corretamente a carga dos enlaces. As métricas MIC [53], ILA [45] e iAWARE [47] tratam interferência entre fluxos e intra-fluxos. Entretanto, a não isotonicidade dessas métricas as tornam inapropriadas para roteamento de estado de enlace [53]. Os protocolos apresentados para WMNs multi-rádio (MR-LQSR e AODV-MR) usam as métricas WCETT e iAWARE em roteamento sob demanda.

Na maioria dos trabalhos citados, a análise de desempenho foi realizada com um

número limitado de nós e poucos fluxos concorrentes nas respectivas topologias. Entretanto, escalabilidade é um fator crítico em WMNs. Com o aumento do número de fluxos, fato esperado em *backbones*, as métricas de caminho (fim-a-fim) podem não apresentar bom desempenho, devido à interferência entre fluxos e ao *overhead* de controle. Nestes cenários, o uso de menores caminhos (*shortest paths*) se torna uma escolha interessante, como apontado em [29].

Em nossa proposta, usamos uma métrica de QoS calculada localmente, não cumulativa, integrada ao protocolo de roteamento OLSR. A métrica é baseada na taxa de perda de pacotes *reais* do enlace. O protocolo usa essa métrica de qualidade do enlace para selecionar um conjunto restrito de nós que difundem informações de topologia da rede e compõem as rotas. Variações significativas na métrica são tratadas na vizinhança de 1 salto e não envolvem divulgação para os demais nós da rede, preservando escalabilidade. A abordagem de *soft QoS* é uma aposta mais realista e apropriada para provisão de QoS em WMNs. Outro fator importante é coordenar esforços em várias camadas [2].

Capítulo 5

Protocolo de roteamento LQ-OLSR

Este capítulo apresenta o cenário de estudo, a motivação e as idéias centrais de nossa proposta de protocolo de roteamento para redes *mesh* sem fio. Também descrevemos sucintamente o protocolo OLSR, usado como base para nosso trabalho. Ao final, apresentamos o protocolo de roteamento LQ-OLSR (*Link Quality OLSR*) com os algoritmos principais e comentamos alguns detalhes da implementação realizada.

5.1 Cenário de estudo

O cenário de estudo compõe-se de roteadores/APs estacionários conectados entre si formando um *backhaul mesh*, além de clientes fixos ou móveis. Os clientes operam em modo infra-estruturado, ou seja, conectam-se a um AP *mesh*. Essa infra-estrutura provê conectividade com outras redes, tais como a Internet e outras redes sem fio (Wi-Fi, WiMAX, celular, etc.) através de funcionalidades de *gateway/bridge* nos roteadores *mesh*.

Para prover funcionalidade de *backbone*, as WMNs necessitam de um desempenho superior ao das redes *ad-hoc* móveis. A característica diferenciada dos roteadores *mesh*, sem as restrições de energia e custo dos nós das MANETs, permite às WMNs se beneficiar do uso de múltiplos rádios para aumentar a capacidade da rede. No cenário proposto, cada roteador *mesh* pode ser equipado com vários rádios operando em diferentes canais, possibilitando transmissão e recepção simultâneas. A alocação de canais é fixa, ou seja, é definida *a priori* e se mantém inalterada por um longo período de tempo. A Figura 5.1 ilustra o cenário proposto.

O uso de vários canais minimiza a interferência, reduzindo a contenção e aumentando o desempenho da rede. O avanço da tecnologia e a redução do custo das interfaces sem fio tornam uma solução multi-rádio viável e adequada para a implantação de redes *mesh* sem fio. Os estudos foram desenvolvidos usando o padrão IEEE 802.11b, sem alterações. A solução pode ser aplicada em outras redes sem fio, tais como redes 802.11a e 802.16.

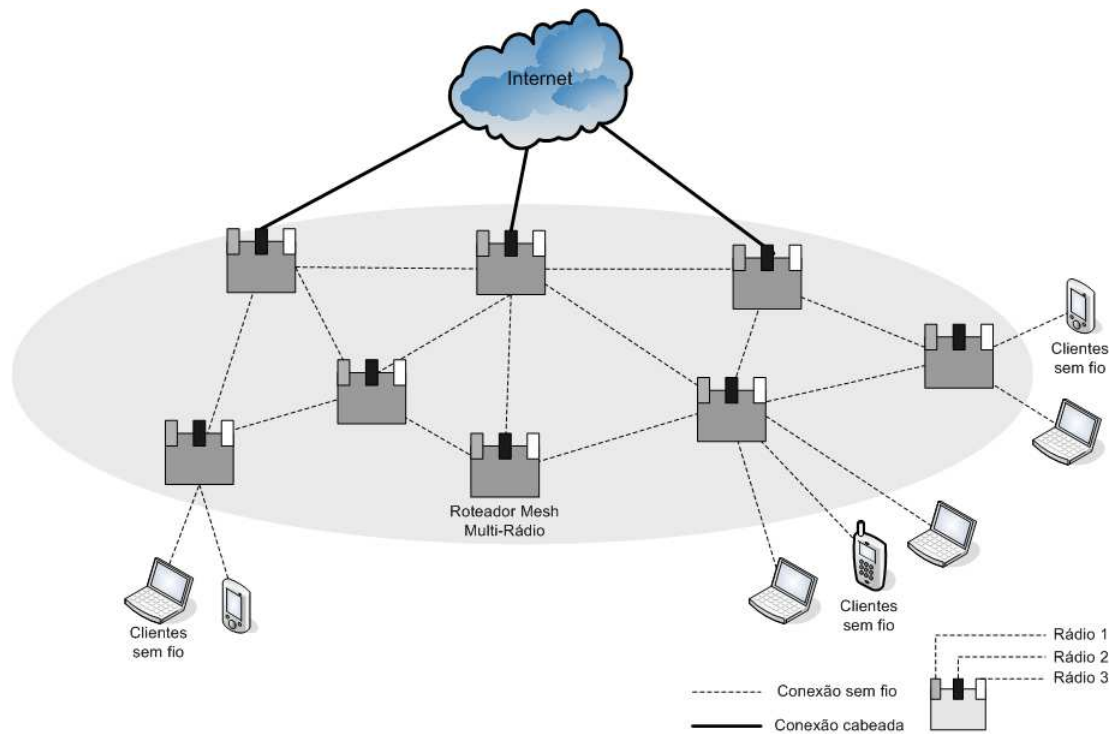


Figura 5.1: Cenário de WMN infra-estruturada multi-rádio.

Portanto, resumimos algumas premissas assumidas em relação à rede (cenário) em que o protocolo proposto irá operar:

- Todos os nós da rede são estacionários;
- Cada nó é equipado com um ou mais rádios 802.11. O número de rádios por nó é o mesmo;
- Os rádios em um nó operam em canais diferentes não interferentes. A alocação de canais é determinada por uma entidade externa e é estática.

5.2 Motivação

A natureza *ad-hoc* das redes *mesh* sem fio possibilita uma implantação rápida e flexível, porém introduz desafios técnicos em diferentes áreas, tais como acesso ao meio, roteamento, segurança e qualidade de serviço (QoS). As aplicações das WMNs tem requisitos de QoS diferenciados por tipo de tráfego, portanto, é necessário garantir métricas de qualidade de serviço nas transmissões. As características inerentes do meio sem fio, com altas

taxas de perda, atraso e *jitter*, tornam a obtenção de QoS em redes *mesh* sem fio um grande desafio.

Em redes multi-salto, o processo de descobrimento e manutenção de rotas influencia diretamente o desempenho da rede, portanto a escolha de um protocolo de roteamento é crucial na provisão de qualidade de serviço em WMNs.

Como as WMNs compartilham várias características com as MANETs, os protocolos de roteamento desenvolvidos para essas redes podem ser aplicados em redes *mesh*. Algumas soluções comerciais existentes de redes *mesh* utilizam variações de protocolos de roteamento pró-ativos desenvolvidos para redes *ad-hoc*. Como exemplo, podemos citar a Firetide Networks [16], cujo roteamento é baseado no protocolo TBRPF [34] e a rede *mesh* da Microsoft [30], baseada no protocolo LQSR [14].

No entanto, um protocolo de roteamento específico para redes *mesh* precisa capturar requisitos específicos das WMNs, tais como [2]:

- Métrica: a maioria dos protocolos de roteamento para redes *ad-hoc* seleciona caminhos com menor número de saltos (*hop count*). Estes protocolos tendem a selecionar enlaces de longa distância, que em geral são lentos e com baixa vazão. Para suportar a função de *backhaul* das WMNs, são necessárias métricas de roteamento que privilegiem a qualidade dos enlaces entre os nós que formam a infra-estrutura da rede;
- Escalabilidade: em redes formadas por uma grande quantidade de nós, é importante estabelecer caminhos de forma rápida, minimizando o atraso, e reduzir os pacotes de controle que causam *overhead* na rede. A escalabilidade ainda é um desafio para os protocolos de roteamento para redes *ad hoc*, tanto os reativos quanto os pró-ativos;
- Balanceamento de tráfego e tolerância a falhas: a topologia *mesh* provê redundância de caminhos e robustez contra a queda de enlaces. Quando há congestionamento em uma parte da rede, o tráfego pode ser roteado para outra área. O protocolo de roteamento deve ser capaz de lidar com esses fatores;
- Suporte diferenciado para os roteadores *mesh*: ao contrário das redes *ad-hoc* móveis, os roteadores *mesh* não possuem restrições de consumo de energia e tem mobilidade mínima (ou inexistente), o que permite simplificar o protocolo de roteamento nesses quesitos. Portanto, é necessário um protocolo de roteamento que trate as características diferenciadas dos roteadores *mesh*.

Os protocolos de roteamento reativos conseguem capturar a mobilidade dos nós [50], mas apresentam atraso na descoberta de caminhos. Por esses fatores, eles são mais apropriados para MANETs, onde o foco é mobilidade e não desempenho. Nessas redes, a

contagem de saltos se mostrou uma métrica adequada [14], pois é simples de calcular e mais ágil para refletir mudanças na topologia.

As métricas de roteamento propostas para redes *mesh* multi-rádio (WCETT, MIC, ILA, iAWARE) tratam interferências na rede, porém não possuem isotonicidade. Portanto, para garantir roteamento livre de *loop*, essas métricas não podem ser usadas em protocolos de roteamento pró-ativos de estado de enlace [53].

Nas WMNs, a existência de um *backbone* fixo influencia o projeto do roteamento, pois permite obter informações sobre o ambiente físico, tal como o nível de interferência, e usá-las no processo de roteamento. O monitoramento dos enlaces, através da troca constante de informações, é facilitado pelo uso de um protocolo de roteamento de estado de enlace. A facilidade de obtenção de informações da rede, somada à disponibilidade imediata de caminhos, torna o roteamento pró-ativo apropriado para redes *mesh* sem fio.

Experimentos em ambientes reais conduzidos por projetos acadêmicos de WMNs mostraram o impacto da variação das condições da rede nos protocolos de roteamento. No projeto MIT¹ Roofnet [1], o número de atualizações não pôde ser disseminado com a rapidez suficiente devido à contenção do tráfego de controle com o de dados, levando a rotas não ótimas. No projeto ReMesh [42] da UFF², em parceria com a RNP³, foi observado instabilidade de rotas e alta taxa de perda de pacotes numa rede com 6 roteadores, usando o protocolo OLSR e a métrica ETX cumulativa [39]. Os resultados obtidos levam a uma discussão quanto à abordagem de encontrar um caminho ótimo ou usar uma estratégia local baseada em enlaces ótimos [50].

5.3 Idéias centrais

O enfoque deste trabalho é o roteamento em WMNs infra-estruturadas. Nessa arquitetura, os roteadores são estacionários e as mudanças na topologia da rede não são frequentes. A natureza estática do *backbone* das WMNs permite uma melhor estimativa da qualidade dos enlaces através de medições regulares. Também permite utilizar uma maior diversidade de canais na infra-estrutura a fim de reduzir interferência e aumentar a vazão total da rede. Embora mudanças na topologia da rede sejam raras, as variações de estado e/ou qualidade dos enlaces causam impacto no processo de roteamento, principalmente em algoritmos com métricas cumulativas.

Considerando os fatores citados, definimos as seguintes metas principais para o protocolo proposto:

¹Massachusetts Institute of Technology

²Universidade Federal Fluminense

³Rede Nacional de Ensino e Pesquisa

- Deve ser um protocolo pró-ativo, considerando que a topologia num *backhaul* é estática e o monitoramento dos enlaces é facilitado;
- Deve considerar a qualidade dos enlaces na seleção de rotas;
- A métrica de qualidade deve ser simples e computacionalmente fácil de calcular, além de isotônica;
- Localizado. Decisões de roteamento devem ser baseadas em informações disponíveis localmente, incluindo a vizinhança de 2 saltos. Deve minimizar a troca de informações globais e reduzir o impacto de atualizações de rotas;
- Deve preservar escalabilidade. O protocolo deve tratar o tamanho e a densidade de nós da rede. Por exemplo, o processo de inundação deve ser aperfeiçoado em redes grandes, a fim de reduzir o *overhead*, pois o número de pacotes de controle gerados pelo protocolo de roteamento afeta a transmissão de dados e a vazão da rede;
- Deve considerar o padrão (o tipo e as características) de tráfego. Deve visar técnicas de balanceamento/distribuição de tráfego, por exemplo, para maximizar o uso de recursos da rede e evitar congestionamento;
- Deve evitar instabilidade de rotas.

A característica de *backhaul* das WMNs nos motivou a investir num protocolo de roteamento pró-ativo, onde os nós mantêm informações sobre o estado dos enlaces e a topologia da rede, que são utilizadas para selecionar os caminhos, evitando atraso no descobrimento de rotas. Entre os protocolos pró-ativos existentes para redes sem fio, escolhemos o OLSR [12] como base para nosso trabalho, devido à sua escalabilidade e ao largo uso em trabalhos acadêmicos.

5.4 Protocolo OLSR

O OLSR é um protocolo de roteamento desenvolvido para MANETs e padronizado pelo IETF⁴ que utiliza *Multipoint Relays* (MPRs) para repassar as mensagens de controle, minimizando o *overhead*. O protocolo é uma otimização dos protocolos de estado de enlace clássicos, herdando a estabilidade do algoritmo e a vantagem de ter as rotas disponíveis imediatamente quando necessárias devido à sua natureza pró-ativa [12].

Como um protocolo pró-ativo, o OLSR contém componentes para:

⁴Internet Engineering Task Force

- Descoberta de vizinhos: baseado na troca periódica de mensagens de *hello* dentro da vizinhança de um nó;
- Propagação do estado dos enlaces: introduz um mecanismo para difusão eficiente do tráfego de controle pela rede usando o conceito de *multipoint relays* (MPRs);
- Roteamento: usa as informações de topologia divulgadas pelos nós para computar rotas ótimas usando o algoritmo de menor caminho (*shortest-path*) e métrica de contagem de saltos.

O OLSR usa dois tipos principais de mensagens de controle: *hello* - para descobrimento de vizinhos - e *TC* (*Topology Control*) - para difusão da topologia da rede. As mensagens de *hello* são trocadas periodicamente entre os vizinhos de 1 salto e permitem detectar mudanças (inclusão ou remoção de nós) na vizinhança de um nó. As mensagens de controle de topologia (TC) são propagadas em intervalos regulares para todos os nós na rede, com a finalidade de prover a cada nó informações de estado de enlace suficientes para a seleção de rotas. Para melhorar o processo de inundação, somente um conjunto de nós de *relay*, denominados MPRs, pode repassar as mensagens de controle pela rede, o que reduz o número de transmissões.

5.4.1 Otimização do processo de inundação de mensagens: MPR

O mecanismo de inundação (*flooding*) de mensagens do protocolo OLSR é uma otimização do esquema de inundação simples. Na inundação simples, todos os nós repassam uma mensagem *broadcast* ao recebê-la pela primeira vez. Assim, nada impede que dois nós vizinhos repassem a mesma mensagem para os mesmos nós, conforme Figura 5.2 (a). No OLSR, o problema de transmissões duplicadas de uma mensagem em uma região é tratado através do conceito de nós de *relay* (MPR). Os MPRs são nós selecionados que encaminham as mensagens de controle durante o processo de inundação [12]. Essa técnica reduz o *overhead* de mensagens quando comparado com o mecanismo básico de inundação, onde todo nó retransmite cada mensagem recebida.

Um exemplo de inundação usando MPRs está ilustrado na Figura 5.2 (b). O nó central é a origem da mensagem. Cada seta indica que um nó recebeu uma cópia da mensagem. Os nós pretos são os nós MPRs escolhidos pelo nó central.

No processo de seleção de MPRs, cada nó escolhe um conjunto mínimo de nós vizinhos de 1 salto que permita alcançar toda a vizinhança de 2 saltos. Este conjunto consiste nos MPRs de um nó. Por sua vez, cada nó MPR mantém uma lista dos nós que o selecionaram como MPR, constituindo o conjunto de seletores.

O OLSR implementa duas melhorias do processo de inundação:

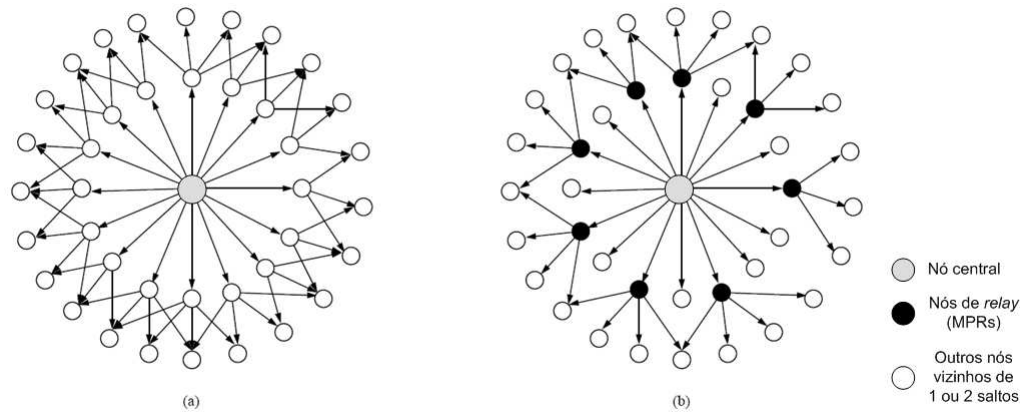


Figura 5.2: Exemplo de inundação simples (a) e com o uso de MPRs (b).

- Apenas os nós selecionados como MPRs podem gerar mensagens de controle, o que reduz o número de nós que divulgam enlaces;
- São divulgados somente os enlaces entre um nó MPR e seus seletores, reduzindo o tamanho das mensagens de controle.

Portanto, diferentemente dos algoritmos de estado de enlace clássicos, apenas um subconjunto de enlaces de uma vizinhança é declarado, ao invés de todos os enlaces. Isso compõe uma topologia parcial da rede e faz com que as rotas contenham apenas MPRs como nós intermediários.

A utilização de MPRs reduz o número de retransmissões e de enlaces divulgados, o que diminui o *overhead* do protocolo de roteamento. No entanto, a heurística de seleção de MPRs, ao minimizar o conjunto de nós MPR, também restringe o número de caminhos e pode excluir bons enlaces pois não considera a qualidade dos mesmos.

5.4.2 Seleção de rotas

No OLSR, cada nó mantém informações sobre os enlaces com seus vizinhos de 1 e 2 saltos obtidas através das mensagens de *hello*, além de informações de topologia da rede recebidas pelas mensagens de TC. Devido ao uso de MPRs, apenas um subconjunto de enlaces é conhecido, resultando numa topologia parcial da rede.

O algoritmo de roteamento usa a métrica de contagem de saltos e seleciona o menor caminho entre um par de nós baseado na informação da topologia parcial da rede. Consequentemente, as rotas contêm apenas MPRs como nós intermediários entre origem e destino.

As rotas selecionadas são armazenadas numa tabela de roteamento, provendo caminhos para todos os destinos na rede imediatamente. As informações de topologia em cada nó são válidas por um período limitado de tempo e devem ser atualizadas periodicamente para manterem-se válidas. As informações expiradas são removidas e as rotas devem ser recalculadas.

5.5 Protocolo proposto: LQ-OLSR

O protocolo OLSR usa uma estrutura de nós MPRs para otimizar a difusão de mensagens de controle, o que reduz o *overhead* do protocolo. Porém, a heurística de seleção de MPRs, ao minimizar o conjunto/número de nós, pode gerar:

- divulgação de enlaces ruins, pois a qualidade dos enlaces não é considerada;
- concentração de tráfego em alguns enlaces, pois os nós com mais vizinhos tendem a ser selecionados como MPRs e apenas seus enlaces são divulgados na topologia e considerados na construção de rotas;
- vulnerabilidade a falhas, pois a perda de um nó MPR numa topologia com concentração de tráfego pode implicar em indisponibilidade de rotas para diferentes destinos que usam o nó como intermediário.

Em MANETs, onde os nós possuem tipicamente um único rádio, não há ganho de desempenho ao distribuir o tráfego pela rede, devido à interferência entre os fluxos concorrentes, exceto se os fluxos usarem caminhos disjuntos, que não sofrem interferência mútua, mas que são difíceis de calcular. Nas WMNs com múltiplos rádios, porém, o desempenho pode ser melhorado através da distribuição de tráfego e uso de enlaces melhores.

Em nossa proposta, estendemos o protocolo OLSR incorporando funcionalidades dirigidas para redes *mesh* sem fio. Adotamos uma heurística de seleção de MPRs que privilegia a qualidade dos enlaces. Usamos a abordagem de classes para formar a métrica de qualidade dos enlaces. Também implementamos o suporte a múltiplos rádios por nó. A divulgação de um maior número de enlaces, de melhor qualidade, possibilita maior diversidade de caminhos e resistência a falhas. O protocolo desenvolvido, chamado LQ-OLSR (*Link Quality OLSR*), foi apresentado nos artigos [38, 37] e é descrito a seguir.

5.5.1 Métrica de qualidade dos enlaces

Para medir a qualidade dos enlaces, usamos uma função baseada no número de pacotes perdidos no enlace, calculado através do campo *Packet Sequence Number* do pacote. A

perda de pacotes é detectada de duas maneiras:

- contabilizando os *Packet Sequence Numbers* não recebidos (faltantes) em uma interface I. Este campo informa o número sequencial do pacote referente à comunicação entre um par (origem, destino) de interfaces vizinhas. Ele é incrementado em uma interface vizinha VI a cada pacote transmitido com destino à interface I; ou
- verificando um “período longo de silêncio” de um nó. Um “período longo de silêncio” é detectado quando nenhum pacote da interface vizinha VI foi recebido na interface I durante o intervalo de emissão de pacotes de *hello* da interface VI. O intervalo é determinado por um parâmetro configurável do OLSR chamado `HELLO_INTERVAL`, cujo valor padrão é 2 segundos.

Para compor a medida de qualidade, é aplicada uma regra de estabilidade ou instabilidade do enlace, que captura o histórico de qualidade do enlace. Essa estratégia, chamada *Link-hysteresis*, permite uma medição progressiva do enlace. Isto significa que um novo enlace só é considerado estabelecido após um certo período de tempo. Dessa forma, a medida se torna mais robusta contra perdas em rajadas, conectividade transiente e mobilidade dos nós. A regra de estabilidade é aplicada a cada pacote transmitido por VI recebido com sucesso na interface I; a regra de instabilidade é aplicada quando é detectada a perda de um pacote em I.

A qualidade do enlace (*L_link_quality*) é um número real que varia de 0 a 1, sendo o valor 1 considerado a qualidade máxima (ou nenhum pacote perdido). Ela é calculada em cada nó através de uma função que possui um fator parametrizável denominado `HYST_SCALING`, que é um número entre 0 e 1, e representa o valor inicial de qualidade do enlace. Cada vez que um pacote OLSR emitido por VI é recebido por I, a regra de estabilidade é aplicada:

$$L_link_quality = (1 - HYST_SCALING) * L_link_quality + HYST_SCALING$$

A cada pacote OLSR emitido por VI e perdido por I, a regra de instabilidade é aplicada:

$$L_link_quality = (1 - HYST_SCALING) * L_link_quality$$

No protocolo OLSR, essa heurística é utilizada exclusivamente para detectar o estabelecimento e a quebra de enlaces. Se a qualidade de um enlace, representada pelo atributo *L_link_quality*, fica abaixo de um valor limite inferior, o protocolo detecta a quebra do enlace. Para que um enlace seja estabelecido, é necessário que o atributo *L_link_quality* ultrapasse um limite superior de qualidade. Os limites inferior e superior são configurados através dos parâmetros *hyst_threshold_low* e *hyst_threshold_high*, respectivamente.

Em nosso trabalho, estendemos o uso da funcionalidade de monitoramento de enlaces e alteramos o protocolo OLSR para armazenar a qualidade dos enlaces vizinhos e considerá-la na seleção de MPRs de um nó. Desta forma, adicionamos a qualidade do enlace ao processo de roteamento, pois os nós MPRs divulgam enlaces com melhor qualidade que serão considerados na construção das rotas.

Devido a interferências intra-fluxo e entre fluxos, a medida de qualidade dos enlaces varia constantemente (qualquer valor real entre 0 e 1) conforme flutuações de tráfego. Visando manter a estabilidade do protocolo, implementamos uma abordagem de *classes de qualidade* do enlace. Construímos uma função que mapeia a qualidade nos valores inteiros 0, 1, 2 ou 3, representando 4 classes, sendo que o valor 3 corresponde à melhor qualidade. O resultado obtido representa a classe de qualidade do enlace e é armazenado no atributo *N_quality*. Esse atributo é a métrica de qualidade usada no processo de seleção de MPRs de um nó. A cada variação do valor de *L_Link_quality*, a função de mapeamento é reaplicada. Apenas quando houver mudança da *classe* de qualidade, o nó deve refazer a escolha de MPRs, minimizando alterações de rotas.

A métrica de qualidade do enlace é computada em cada nó, é fácil de calcular, e pode ser considerada uma aproximação da taxa de sucesso de transmissão de pacotes num enlace. Sendo uma métrica local, não cumulativa, ela não requer propagação para os demais nós da rede. Essa abordagem evita *overhead* e alterações no formato das mensagens de controle do protocolo, mantendo compatibilidade com o protocolo OLSR original.

Se existir alguma medida das condições do enlace proveniente da camada de enlace (nível de sinal/ruído, por exemplo), ela pode ser usada para compor a métrica de qualidade do enlace. Neste caso, a função de mapeamento de classes pode ser alterada para combinar a medida de qualidade do enlace calculada pelo protocolo e as informações da camada inferior.

A métrica de qualidade proposta não gera *overhead*, pois não necessita de pacotes de sondagem adicionais. Diferentemente da métrica ETX [13], a perda de pacotes é medida usando os pacotes de dados *reais* no enlace, ao invés de contabilizar apenas os pacotes de sondagem (*probe*). Desta forma, a métrica de qualidade consegue capturar a taxa de transmissão e os efeitos da interferência dos enlaces. Além disso, a métrica é isotônica e pode ser usada para selecionar caminhos com peso mínimo e livres de *loop* através de algoritmos eficientes em protocolos de roteamento de estado de enlace.

5.5.2 Seleção de MPRs

Para a seleção de MPRs, inserimos uma comparação da métrica de qualidade (*N_quality*) no algoritmo OLSR original. Dessa forma, cada nó escolhe os vizinhos simétricos de 1

salto que possuem, nessa ordem:

- maior prontidão em encaminhar tráfego de/para outros nós, representado pelo atributo *willingness* de um nó. Este valor pode variar conforme condições locais de energia, tráfego, etc. Um nó com prontidão mínima, ou seja, `WILL_NEVER`, não pode ser escolhido como MPR por nenhum outro nó;
- melhor métrica de qualidade do enlace, isto é, maior *N_quality*. Esse é o passo adicionado ao algoritmo original e está representado na linha 6 do Algoritmo 1;
- maior cobertura (*reachability*), ou seja, que alcança o maior número de nós da vizinhança de 2 saltos.

O algoritmo proposto para seleção de MPRs está representado no Algoritmo 1. Ele recebe dois parâmetros de entrada: V_x , que é o conjunto de vizinhos de 1 salto simétricos do nó x , e $V2x$, conjunto de vizinhos de 2 saltos de x contendo apenas vizinhos simétricos em V_x . A saída é o conjunto de MPRs do nó x , ou MPR_x . A linha 3 do Algoritmo 1 seleciona como MPRs os nós que são os únicos a prover alcance a um nó de $V2x$. Estes nós precisam ser incluídos no conjunto de MPRs para que possamos cobrir toda a vizinhança de 2 saltos. A linha 6 apresenta a comparação de métrica de qualidade do enlace adicionada ao algoritmo original. A linha 8 visa a escalabilidade, ao considerar um mesmo MPR para vários nós.

No OLSR original, a seleção de MPRs de um nó precisa ser refeita quando o estado dos enlaces na vizinhança até 2 saltos muda, ou seja, quando é detectada a inclusão ou a perda de um enlace. Esse processo geralmente implica em alterações na tabela de roteamento, considerando os novos MPRs. Dependendo da frequência com que o processo ocorre, pode acarretar flutuações de rotas na rede.

Em nosso protocolo, é necessário refazer a seleção de MPRs também quando a qualidade dos enlaces muda. Para minimizar instabilidades no roteamento, a métrica usa a abordagem de classes de qualidade. Dessa forma, variações na qualidade do enlace só afetam o conjunto de MPRs se estas forem significativas, ou seja, se implicarem em mudança de classe de qualidade do enlace. Além disso, consideramos apenas as reduções de qualidade, ou seja, escolhemos os novos MPRs de um nó apenas quando a nova métrica de qualidade do enlace de um MPR é menor que a anterior.

Resumindo, o conjunto de MPRs de um nó é refeito se e somente se:

- a nova métrica (classe) de qualidade do enlace é menor que a anterior, e
- o enlace interliga um nó de *relay* (MPR).

Algoritmo 1 Seleção_MPR (V_x , V_{2x} , MPR_x)

Entrada: V_x : conjunto de vizinhos de 1 salto simetricos do no x ;
 V_{2x} : conjunto de vizinhos de 2 saltos de x contendo apenas
 vizinhos simetricos em V_x . V_{2x} nao contem nenhum vizinho
 de 1 salto de x .
 Saida: MPR_x : conjunto de MPRs do no x .

```

1 Inicio
2   inicia com um conjunto vazio  $MPR_x$ 
3   insere em  $MPR_x$  os nos de  $V_x$  que sao os unicos a prover alcance a um no
   em  $V_{2x}$ 
4   exclui de  $V_{2x}$  os nos que foram cobertos pelo passo anterior
5   enquanto  $V_{2x}$  nao estiver vazio
6     seleciona o no de  $V_x$  que possui maior "willingness". Em caso de
       empate, escolhe o no de  $V_x$  que possui maior N_quality. Em caso
       de empate, seleciona o no de  $V_x$  com maior "reachability"
7     insere o no selecionado em  $MPR_x$ 
8     exclui de  $V_{2x}$  os nos que foram cobertos pelo no selecionado
9 Fim
```

O processo envolve escolher um novo conjunto de MPRs, considerando os enlaces com melhor qualidade. Assim, se a qualidade de algum enlace vizinho aumentou, essa variação será considerada nesse momento. Por outro lado, se temos apenas acréscimo de qualidade dos enlaces, o processo não é refeito. Deixamos esse caso como estudo futuro, pois quanto mais alteramos o conjunto de MPRs, mais afetamos as rotas, fato que pode gerar maior instabilidade na rede.

Para manter a escalabilidade, a variação de qualidade é tratada na vizinhança até 2 saltos, e não requer divulgação para os demais nós na rede.

5.5.3 Seleção de rotas

A partir das informações de estado dos enlaces vizinhos e da topologia divulgada pelos MPRs, cada nó calcula sua tabela de roteamento, usando a contagem de saltos como métrica de roteamento. Somente os enlaces entre um nó MPR e seus seletores são divulgados, ou seja, um subconjunto de enlaces compõe uma topologia *parcial* da rede. Consequentemente, as rotas selecionadas contêm apenas MPRs como nós intermediários entre origem e destino. Nosso protocolo combina essa característica inerente do OLSR com a seleção de MPRs com melhor qualidade, resultando em uma topologia parcial

contendo os enlaces de maior qualidade.

O processo de roteamento também foi alterado para tratar a qualidade dos enlaces na seleção de rotas até a vizinhança de 2 saltos. Conforme detalhado na Seção 5.5.1, a métrica de qualidade do enlace é computada em cada nó e armazenada no campo *N_quality*. Em nosso algoritmo, usamos o atributo *N_quality* como métrica para escolher o nó intermediário (vizinho de 1 salto) para atingir os vizinhos de 2 saltos (ver linha 6 do Algoritmo 2).

Para caminhos com mais de dois saltos, é usado o algoritmo de roteamento do OLSR original, que seleciona rotas com menor número de saltos (*hop count*) entre origem e destino. A contagem de saltos é uma métrica simples e fácil de calcular. Sendo uma métrica isotônica, é possível selecionar caminhos menores e livres de *loop* através de algoritmos eficientes. Sua limitação é não considerar as diferenças de taxas de transmissão e perda de pacotes entre os enlaces, nem interferências na rede, podendo não apresentar um bom desempenho [53]. Em nossa proposta, contornamos essa limitação com o uso da métrica de qualidade do enlace na seleção de MPRs e conseqüente divulgação de melhores enlaces. Dessa forma, o algoritmo de roteamento proposto combina a métrica de contagem de saltos do caminho e a qualidade dos enlaces, encontrando caminhos menores com enlaces melhores.

O algoritmo proposto para seleção de rotas está apresentado no Algoritmo 2, que recebe dois parâmetros de entrada: V_x , conjunto de vizinhos de 1 salto simétricos do nó x , e $V2x$, conjunto de vizinhos de 2 saltos de x contendo apenas vizinhos simétricos em V_x . A linha 3 do Algoritmo 2 inicia a tabela de roteamento com os vizinhos de 1 salto simétricos de x . A linha 6 apresenta a comparação de métrica de qualidade do enlace na seleção de rotas de 2 saltos. A linha 9 representa a computação das rotas com mais de 2 saltos. O resultado é a tabela de roteamento do nó x , armazenado em TR_x .

As rotas selecionadas são armazenadas numa tabela de roteamento, provendo caminhos para todos os destinos na rede imediatamente. As informações de topologia em cada nó são válidas por um período limitado de tempo e devem ser atualizadas periodicamente para manterem-se válidas. As informações expiradas são removidas e as rotas devem ser recalculadas.

A proposta mantém a isotonicidade do protocolo e usa uma métrica de qualidade fácil de calcular. Para manter a escalabilidade, é necessário refazer a tabela de roteamento apenas quando o estado e/ou a qualidade dos enlaces na vizinhança de 1 ou 2 saltos muda, ou quando é detectada a perda de um enlace (por mensagens de TC). Cada nó recalcula suas rotas, e isto não gera mensagens adicionais nem requer divulgação para os demais nós. No protocolo QOLSR [6], que usa métrica cumulativa, essas computações são mais freqüentes, pois são afetadas pela variação das condições de QoS de todos os enlaces da rede. Cada mudança da métrica de QoS envolve propagação para toda a rede,

Algoritmo 2 Seleção rotas (Vx, V2x, TRx)

Entrada: Vx: conjunto de vizinhos de 1 salto simetricos do no x;
 V2x: conjunto de vizinhos de 2 saltos de x contendo apenas
 vizinhos simetricos em Vx. V2x nao contem nenhum vizinho
 de 1 salto do no x.
 Saida: TRx: tabela de roteamento do no x.

```

1 Inicio
2   inicia com um conjunto vazio TRx
3   insere em TRx os vizinhos de 1 salto simetricos de x (Vx)
4   enquanto V2x nao estiver vazio
5       seleciona um no qualquer n2 de V2x
6       seleciona o no n de Vx que alcanca n2 e possui maior N_quality
7       insere n em TRx
8       exclui n2 de V2x
9   seleciona rotas com mais de 2 saltos e insere-as em TRx
10 Fim
  
```

podendo gerar instabilidade no roteamento, além de maior *overhead*.

5.5.4 Versão LQ2-OLSR

Para efeitos de comparação, também implementamos uma versão dos algoritmos de seleção de MPRs e seleção de rotas considerando a métrica de qualidade do enlace cumulativa na vizinhança de 2 saltos. Nessa versão, denominada LQ2-OLSR⁵ [38, 37], utilizamos o campo *Reserved* das mensagens de *hello* para divulgar a qualidade dos enlaces entre nós vizinhos. Desta forma, os nós conseguem obter a métrica de qualidade dos enlaces da vizinhança até 2 saltos. Então, na seleção de rotas, as métricas de qualidade dos enlaces de 1 e 2 saltos são somadas para determinar o melhor caminho.

Nas simulações realizadas descritas no Capítulo 6, comparamos o desempenho do protocolo LQ-OLSR e a versão LQ2-OLSR. A versão de métrica cumulativa em 2 saltos (LQ2-OLSR) não demonstrou ganhos em relação ao LQ-OLSR, e apresentou maior instabilidade no roteamento. Portanto, nosso trabalho foi baseado na extensão de qualidade em 1 salto (LQ-OLSR), que não requer alteração nas mensagens de *hello*, mantendo compatibilidade com o protocolo OLSR original.

⁵2-hop Link Quality OLSR

5.5.5 Suporte a múltiplos rádios

Em WMNs com um único rádio, cada nó *mesh* funciona como um AP, fornecendo acesso a clientes locais, e como roteador, repassando o tráfego de/para outros nós via enlaces sem fio. O mesmo rádio é usado para acesso e *backhaul* sem fio. Essa arquitetura representa o menor custo na implantação de uma infra-estrutura de rede *mesh*. Entretanto, como cada AP *mesh* usa uma antena omni-direcional para permitir a comunicação com os APs vizinhos, os pacotes gerados por clientes locais são repassados para outros APs através de um único canal de transmissão compartilhado, gerando alta contenção. Além disso, os tráfegos de clientes e *backhaul* competem entre si, e a capacidade disponível do canal é baixa. Embora protocolos possam otimizar o tráfego, quando aumentamos o número de APs na rede, mais tráfego de encaminhamento é introduzido no *backhaul*, reduzindo a banda disponível para os clientes [9]. Portanto, as redes *mesh* com um único rádio não provêm a capacidade e o desempenho em larga escala necessários para a maioria das aplicações atuais. O uso de um único rádio pode ser a opção para redes *ad hoc* móveis ou redes de sensores, onde os requisitos de banda são baixos.

A capacidade e a escalabilidade das WMNs infra-estruturadas podem ser melhoradas com o uso de rádios independentes para acesso cliente e *backhaul* sem fio, operando em frequências/canais diferentes. Dessa forma, o acesso sem fio local não é afetado pelo tráfego de encaminhamento do *backhaul*. No entanto, ainda ocorre contenção no *backhaul*, que é compartilhado, fato que limita a capacidade da rede e gera atraso, tornando a rede imprópria para tráfego de voz [9].

Podemos estender essa solução com o uso de múltiplos rádios por nó dedicados ao *backhaul*. Assim, o *backhaul* passa de uma rede compartilhada para uma rede com enlaces operando em canais independentes e diferentes, reduzindo a interferência. A arquitetura de múltiplos rádios (Figura 5.1) traz diversas vantagens para as WMNs [9]:

- flexibilidade: os rádios de acesso podem ser configurados em canais distintos, permitindo que a WMN suporte dispositivos sem fio de diferentes frequências;
- interferência: o rádio de acesso pode operar no canal com menor interferência numa determinada área. Através de algoritmos de alocação de canais, os rádios de *backhaul* podem ser configurados em canais distintos de forma a minimizar interferências;
- atraso: a redução de contenção de acesso ao meio diminui o atraso, tornando as WMNs multi-rádio apropriadas para aplicações de voz e de tempo real;
- escalabilidade: com alta capacidade, as WMNs multi-rádio podem prover cobertura em grandes áreas, fornecendo acesso sem fio a centenas de usuários.

O avanço da tecnologia e a redução do custo das interfaces sem fio tornam uma solução multi-rádio apropriada para a implantação de redes *mesh* sem fio.

Motivados pelos trabalhos [43, 18] e pela característica de *backbone* das WMNs, introduzimos o suporte a múltiplos rádios ao protocolo OLSR. Dessa forma, os roteadores e APs *mesh* podem ser equipados com vários rádios operando em canais diferentes, trazendo os benefícios de desempenho da arquitetura multi-rádio.

A arquitetura multi-rádio introduz a necessidade de alocar e gerenciar canais entre os nós na rede. Como o enfoque do trabalho é em roteamento, optamos pela estratégia de alocação estática de canais. Esta estratégia de alocação é mais simples, dispensa um mecanismo de coordenação e não envolve comutação de canais. O atraso de comutação afeta o desempenho da rede, pois aumenta o custo de um *broadcast* e o atraso fim-a-fim. [29].

O protocolo OLSR foi desenvolvido para redes *ad-hoc* móveis onde tipicamente os nós possuem um único rádio e compartilham o mesmo canal de transmissão. Para suporte a múltiplos rádios por nó, alteramos o protocolo OLSR incluindo um atributo que identifica o canal de transmissão usado pelo nó. Este atributo, denominado *nodeChannel*, armazena o canal/rádio usado para transmitir os pacotes e permite utilização futura para (re)alocação de canais entre nós vizinhos.

5.5.6 Implementação

O trabalho foi baseado na implementação OLSR do projeto Hipercom-INRIA⁶ denominada OOLSR⁷ [36], em conformidade com a RFC⁸ 3626 [12]. Desenvolvida para Linux e escrita em C++, é distribuída sob licença GPL-2⁹ [17]. A implementação é completa, ou seja, contém todos os componentes de um protocolo de roteamento, e foi testada em ambientes reais. Através de um *plugin*, é possível usar a implementação no simulador NS-2 (*Network Simulator*) [32].

OOLSR

Para incorporar a métrica de qualidade do enlace e suporte a múltiplos rádios, alteramos as seguintes classes da implementação OOLSR:

- Classe *Node*. Contém o construtor, atributos e métodos de um nó.

Incluímos um atributo denominado *nodeChannel* (tipo *int*) que armazena o canal de transmissão do nó. O atributo identifica a interface (rádio) que deve ser usada para

⁶Institut National de Recherche en Informatique et em Automatique

⁷Object oriented OLSR

⁸Request for Comments

⁹GNU General Public License

transmitir os pacotes. Ele é usado para prover suporte a múltiplos rádios por nó e permite futura utilização para (re)alocação de canais entre vizinhos. Também alteramos o método *EventHelloGeneration()* para divulgar enlaces apenas se o estado estiver OK considerando também a qualidade dos mesmos;

- Classe *HeardIfaceTuple*. Incluímos métodos para obtenção do atributo que armazena a qualidade e para atualização em caso de variação da medida de qualidade;
- Classe *LinkTuple*. Contém informações sobre os enlaces de um nó, incluindo o endereço das interfaces local e vizinha, estado, tempo de expiração, etc.

Adicionamos o atributo *L_link_quality* (tipo *double*) para armazenar a qualidade dos enlaces com os nós vizinhos, calculada segundo a heurística de perda de pacotes citada. Alteramos o construtor da classe e incluímos uma função para obter o valor do atributo *L_link_quality*.

Implementamos o método *getMetric()* que faz o mapeamento do valor de *L_link_quality* para classes de qualidade (valores 1, 2 ou 3), retornando a métrica de qualidade do enlace.

Implementamos métodos responsáveis pela detecção de mudança de qualidade do enlace e atualização do atributo *L_link_quality*, chamados *updateQualityWithLinkMonitoring* e *updateQualityinAssociatedNeighborTuple*.

O método responsável por atualizar o estado do enlace (*_updateStatus*) foi modificado para considerar a métrica de qualidade na detecção do estado do enlace;

- Classe *NeighborTuple*. Contém informações sobre os vizinhos de um nó, incluindo o endereço da interface, estado, *willingness*, etc.

Para tratar a qualidade dos enlaces com os nós vizinhos, inserimos o atributo *N_quality* (tipo *double*) que armazena a métrica de qualidade mapeada a partir do atributo *L_link_quality*.

Também implementamos os métodos *getQuality()* e *updateQuality()*, que são funções para obtenção e atualização do valor do atributo *N_quality*, respectivamente. A função *updateQuality()* verifica se a métrica de qualidade do enlace obtida por *getMetric()* mudou, e então atualiza o atributo *N_quality* com o novo valor. Se o nó vizinho é MPR e a classe de qualidade do enlace diminuiu, recalcula o conjunto de MPRs;

- Seleção de MPRs. Foi acrescentada a comparação de qualidade dos enlaces conforme apresentado no Algoritmo 1;
- Seleção de rotas. Alterações realizadas conforme descrito no Algoritmo 2.

As modificações realizadas não requerem alterações no formato das mensagens de controle do protocolo, mantendo compatibilidade com o OLSR original.

Simulador NS-2

Além das alterações no protocolo OLSR, modificamos a implementação da versão 2.27 do simulador NS-2 para incluir o suporte a múltiplas interfaces por nó. O NS-2 é um simulador de eventos discretos voltado a pesquisas na área de redes de computadores, com suporte para simulações de protocolos TCP¹⁰, UDP¹¹, roteamento e *multicast* em redes cabeadas e sem fio.

O NS-2 é orientado a objetos e usa duas linguagens de programação para atender a necessidades distintas:

- C++ na implementação de protocolos, onde é necessário manipular eficientemente *bytes* e cabeçalhos de pacotes e implementar algoritmos que rodam com grande conjunto de dados;
- OTcl¹² na configuração das simulações, pois permite variação rápida de parâmetros de configuração e número de cenários, onde o tempo de execução não é crítico.

O NS-2 possui uma extensão para simulação de redes sem fio com topologias *ad hoc* e ponto-multiponto (WLANs, por exemplo), usando a classe *MobileNode*. No entanto, como o próprio nome diz, a implementação dessa classe foi desenvolvida para nós das redes *ad hoc* móveis e trata somente nós com uma única interface. Para simular redes *mesh* multi-rádio, realizamos várias modificações no NS-2 para suporte a múltiplos rádios por nó.

Em nosso trabalho, foi necessário alterar as classes C++ referentes à implementação do canal sem fio (classe *WirelessChannel*), tabela arp (classe *ARPTTable*) e MAC 802.11 (classe *Mac802_11*) da camada MAC do NS-2.

Também modificamos as classes OTcl da implementação de nós móveis sem fio (classe *MobileNodes*) e bibliotecas correspondentes para permitir a criação de nós com múltiplas interfaces e a configuração de parâmetros para cada interface (canais diferentes, por exemplo).

¹⁰Transmission Control Protocol

¹¹User Datagram Protocol

¹²MIT Object TCL

Capítulo 6

Simulação e resultados

Foram realizados diversos experimentos no simulador NS-2 para testar a eficácia do protocolo proposto aplicado à arquitetura multi-rádio em WMNs. Comparamos o protocolo OLSR original com monitoramento de enlaces (OLSR), e o protocolo proposto com QoS e múltiplos rádios nas versões de 1 salto (LQ-OLSR) e 2 saltos (LQ2-OLSR). Neste capítulo, descrevemos os cenários e parâmetros utilizados nas simulações e apresentamos uma análise dos resultados obtidos.

6.1 Parâmetros de simulação

Os parâmetros do NS-2 usados nas simulações foram os seguintes: interface 802.11b, taxa de dados de 11Mbps, antena omnidirecional, propagação *TwoRayGround*, fila de tamanho 50 e mecanismo de RTS/CTS¹ desabilitado. Esses valores estão representados na Tabela 6.1.

Os parâmetros do protocolo de roteamento usados nos experimentos foram os *default* do OLSR original, com modificações apenas nos valores de *hyst_threshold_low* e *hyst_threshold_high*. Os parâmetros *hyst_threshold_low* e *hyst_threshold_high* representam, respectivamente, os limites inferior e superior de qualidade usados para determinar o estabelecimento e a quebra de enlaces. Realizamos simulações com diversas combinações de valores para esses parâmetros. Apresentamos na Tabela 6.2 os parâmetros ajustados de forma a refletir os valores usados na função de mapeamento de classes de qualidade.

¹Request To Send/Clear To Send

Tabela 6.1: Parâmetros do NS-2 usados nas simulações.

Parâmetros	Valores
Modelo de canal	<i>WirelessChannel</i>
Modelo de Propagação	<i>TwoRayGround</i>
Modelo de Antena	<i>OmniAntenna</i>
Padrão IEEE	<i>802.11b</i>
Taxa de dados MAC	<i>11Mbps</i>
RTS/CTS	<i>Desabilitado</i>
Tipo de fila	<i>DropTail/PriQueue</i>
Tamanho da fila	<i>50</i>

Tabela 6.2: Parâmetros do OLSR usados nas simulações

Parâmetros	Valores
HELLO_INTERVAL	2
TC_INTERVAL	5
hyst_threshold_low	0.25
hyst_threshold_high	0.75
hyst_scaling	0.5

6.2 Cenários de simulação

Para as simulações, trabalhamos com dois tipos de cenários: cenário I, com 50 nós e área de 1000m x 1000m, e cenário II, com 100 nós e área de 2000m x 2000m. Para ambos os tipos, geramos 100 cenários distintos, com distribuição normal aleatória dos nós, respeitando uma distância mínima de 100m entre eles. Para cada cenário, selecionamos arbitrariamente 10% dos nós para funcionar como *gateways*. Diferente de outros trabalhos, os *gateways* não são posicionados nas bordas do cenário; eles são selecionados independentemente de sua localização geográfica. Acreditamos que essa distribuição reflete mais apropriadamente os cenários reais de implantação de redes *mesh* sem fio.

Outra diferença em nossos experimentos consiste no padrão de tráfego. A crescente utilização de aplicações P2P² causou mudanças no tipo de tráfego, com o aumento significativo de banda para *upload* de vídeos, músicas, etc. Portanto, ao contrário de trabalhos anteriores, consideramos importante simular *subida* e *descida* de dados entre os clientes da rede *mesh* e a rede cabeada. Portanto, o tráfego foi concentrado nos *gateways*, nos

²Peer-to-Peer

sentidos *upstream* e *downstream*, com origem e destino aleatórios. Para simular aplicações de tempo real, usamos tráfego CBR³ com pacotes de 512 *bytes* a cada 0.02s. Os fluxos CBR foram iniciados aleatoriamente, a partir do instante 10, com duração máxima de 60s por fluxo. O tempo total de cada simulação foi de 130s.

Tabela 6.3: Cenários usados nas simulações.

Cenário	I	II
Número de nós	50	100
Área	1000m x 1000m	2000m x 2000m
Distância mínima entre nós	100m	100m
Número de <i>gateways</i>	5	10
Posicionamento dos <i>gateways</i>	aleatório	aleatório
Carga baixa	30 fluxos	20 fluxos
Carga média	40 fluxos	30 fluxos
Carga alta	50 fluxos	40 fluxos
Padrão de tráfego	<i>upstream</i> e <i>downstream</i> (<i>gateways</i>)	<i>upstream</i> e <i>downstream</i> (<i>gateways</i>)
Número de cenários gerados	100	100
Duração da simulação	130s	130s

Para cada cenário, consideramos três variações de carga nas simulações: baixa, média e alta, correspondentes a quantidade de fluxos injetados. A Tabela 6.3 apresenta os cenários usados nas simulações.

6.3 Alocação de canais

Nos experimentos com protocolos multi-rádio, cada nó foi equipado com três interfaces (rádios) configuradas nos canais ortogonais 1, 6 e 11 do padrão IEEE 802.11b, dedicadas ao tráfego de *backhaul*. Um rádio opera como transmissor e receptor, os demais são apenas receptores (Figura 6.1). Desta forma, mantemos a conectividade da rede, pois todos os nós recebem pacotes pelos três canais utilizados. Ao mesmo tempo, reduzimos o custo de implantação da WMN, devido ao uso de interfaces mais simples, apenas receptoras.

Assim como em [15, 47], usamos uma estratégia de alocação estática de canais, desacoplada do protocolo de roteamento. O canal da interface transmissora é definido de forma aleatória no início e mantido até o final da simulação. As interfaces receptoras operam nos canais ortogonais restantes. Como o transmissor de cada nó é configurado

³Constant Bit Rate

em um dos três canais disponíveis, reduzimos a probabilidade de interferência com os nós vizinhos. Fixando um canal para transmissão, evitamos o atraso de comutação de canais na interface.

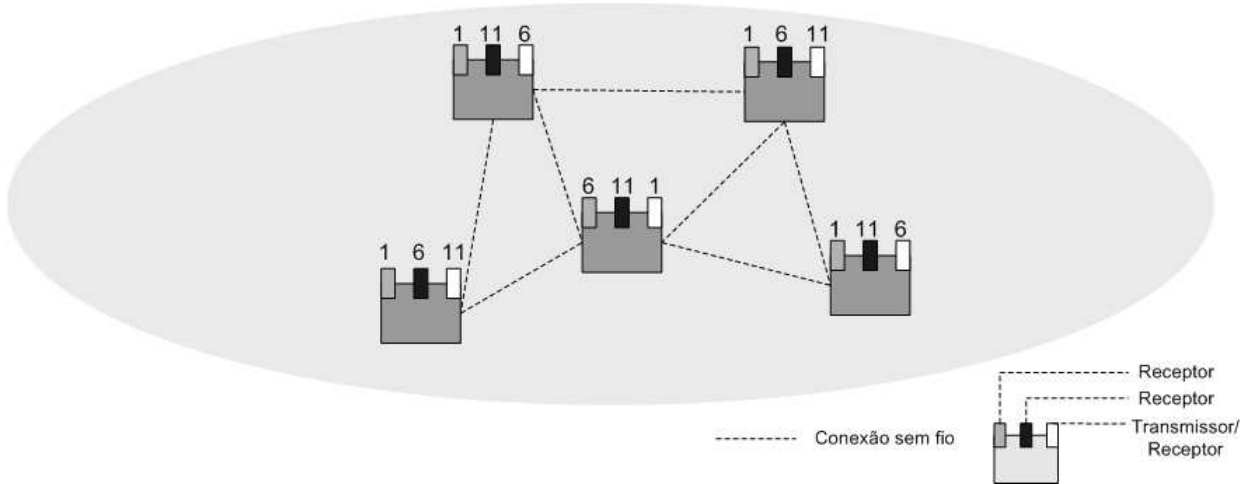


Figura 6.1: Exemplo de alocação de canais utilizada.

6.4 Resultados

As principais métricas de desempenho utilizadas foram os resultados médios obtidos quanto à vazão da rede, atraso, taxa de descarte de pacotes e *overhead* do protocolo de roteamento, calculados da seguinte forma [38, 37]:

$$Vazão(kBps) = \text{kbytes de dados recebidos} / \text{tempo de duração}$$

$$Atraso(ms) = \text{atraso total} / \text{pacotes recebidos}$$

$$\text{Descarte de pacotes}(\%) = \text{pacotes descartados} / \text{pacotes enviados}$$

$$\text{Overhead}(\%) = \text{bytes de controle} / \text{bytes total}$$

Para calcular a vazão, computamos apenas pacotes de dados, ou seja, não contabilizamos os pacotes de controle. Também descartamos retransmissões. Então, podemos considerar essa medida como a taxa útil de pacotes na rede (*goodput*).

Além das métricas de desempenho citadas acima, usamos outras medidas de comparação entre os protocolos OLSR, LQ-OLSR e sua variação de 2 saltos (LQ2-OLSR) a fim de prover uma análise mais completa. As medidas adicionais incluem:

- número total de pacotes descartados por falta de rota (pacotes sem rota) e de pacotes que excederam o tamanho da fila (estouro de fila). Essas métricas possibilitam uma

avaliação mais detalhada da taxa de descarte de pacotes, especificando a razão do descarte;

- número de vezes que foi recalculada a tabela de roteamento (mudanças de rota), refletindo a estabilidade/instabilidade de roteamento. O valor apresentado é o somatório dos valores de todos os nós da rede durante a simulação;
- quantidade total de enlaces perdidos (quebra de enlaces) durante a simulação.

Em todos os gráficos comparativos de desempenho, utilizamos os valores médios obtidos em 100 iterações e intervalo de confiança de 95%.

Resultados do cenário I

Primeiramente, apresentamos os resultados obtidos nas simulações com o cenário I (50 nós, 1000m x 1000m). A Figura 6.2 ilustra a vazão média da rede, sob cargas baixa, média e alta. As extensões de QoS propostas (LQ-OLSR e LQ2-OLSR) praticamente dobram a vazão da rede no cenário com carga baixa. Conforme aumentamos o número de fluxos (carga) na rede, o ganho de desempenho em relação ao OLSR original torna-se ainda mais significativo. Este comportamento é esperado e pode ser explicado pela distribuição de rotas por enlaces com melhor qualidade em arquitetura multi-rádio.

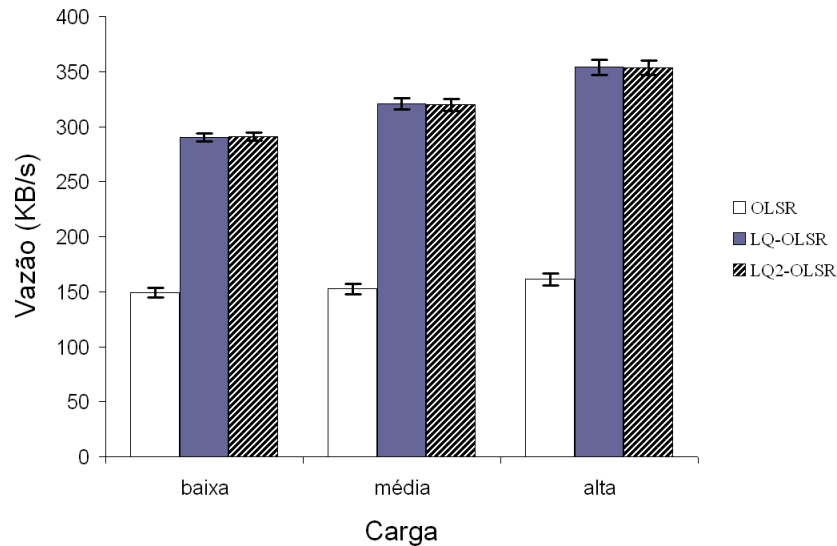


Figura 6.2: Vazão (*goodput*) em cenário com 50 nós.

O atraso médio observado nas simulações com os protocolos LQ-OLSR e LQ2-OLSR é aproximadamente 86% menor que com o OLSR (Figura 6.3). A redução significativa no

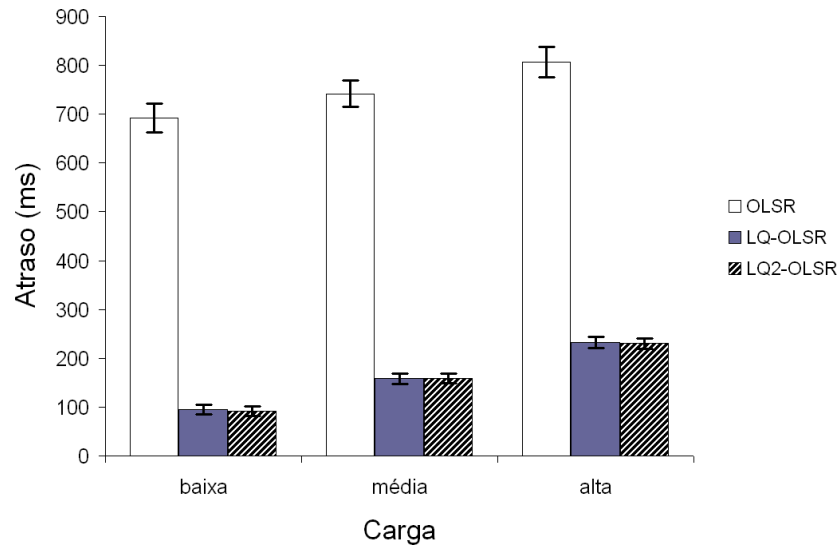


Figura 6.3: Atraso em cenário com 50 nós.

atraso viabiliza o uso de aplicações de tempo real, tal como VoIP. Diferente do comportamento da vazão da rede, a vantagem no atraso sobre o OLSR vai diminuindo à medida em que a carga da rede aumenta. Isto acontece devido à maneira de se calcular o atraso: em cada fluxo, só é contabilizado o atraso dos pacotes que foram recebidos com sucesso no nó destino. Assim, o atraso dos pacotes que foram descartados não é computado. Como a vazão do LQ-OLSR é maior, mais pacotes são entregues com sucesso, ao custo de maior atraso sob carga alta.

A Figura 6.4 apresenta a taxa de descarte de pacotes dos protocolos OLSR, LQ-OLSR e LQ2-OLSR nos cenários com carga baixa, média e alta. A atuação do LQ-OLSR mostrou-se bastante significativa sob todas as cargas, com máximo de 28% de perda de pacotes em carga alta. Em compensação, o protocolo OLSR teve desempenho sofrível até sob carga baixa, pois perdeu mais da metade (52,52%) dos pacotes enviados na rede, contra cerca de apenas 8% do LQ-OLSR e LQ2-OLSR. Estes resultados comprovam a necessidade de um protocolo dirigido para redes *mesh* sem fio, que garanta métricas de QoS para suportar aplicações multimídia e de tempo real.

Em nossos experimentos, também avaliamos a quantidade de enlaces perdidos por protocolo. Relembrando, a quebra de um enlace é detectada quando a qualidade do mesmo, calculada através do número de pacotes perdidos, fica abaixo de um limite inferior determinado, representado pelo parâmetro *hyst_threshold_low*. Usando o mesmo valor de *hyst_threshold_low* em todas as simulações, obtivemos o gráfico comparativo apresentado na Figura 6.5. O número de enlaces perdidos nos protocolos LQ-OLSR e LQ2-OLSR é, no mínimo, 56% menor que no OLSR. Sob carga baixa, a diferença é de 76%. Esses valores demonstram a maior estabilidade dos enlaces e confiabilidade da rede obtidas

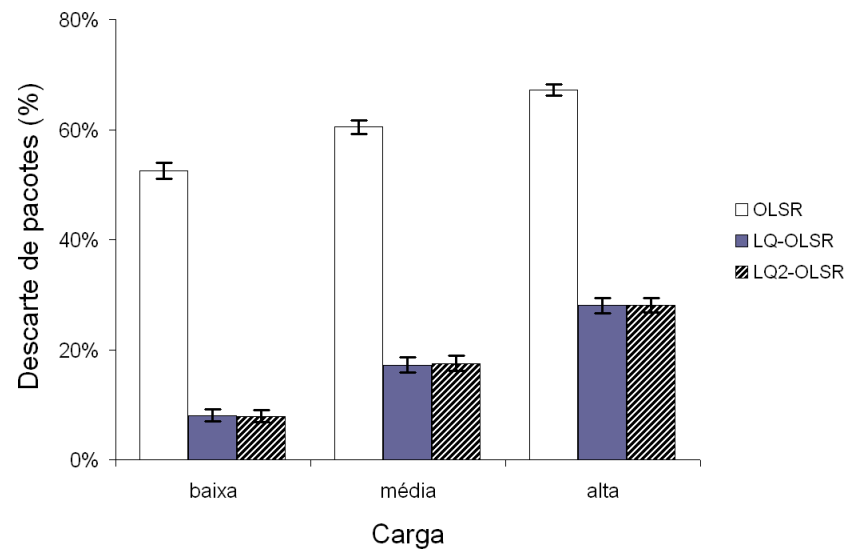


Figura 6.4: Descarte de pacotes em cenário com 50 nós.

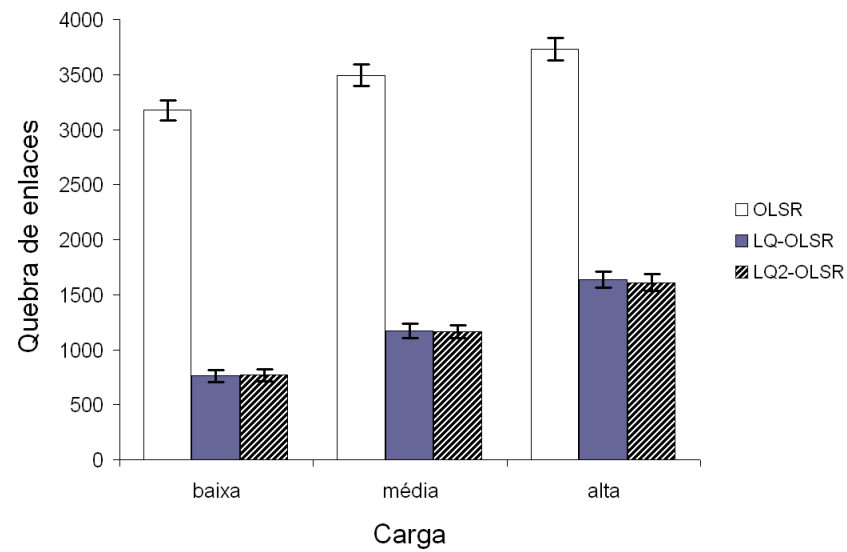


Figura 6.5: Quebra de enlaces em cenário com 50 nós.

com o protocolo LQ-OLSR, que implementa roteamento com distribuição de tráfego e qualidade dos enlaces.

A grande quantidade de enlaces perdidos no protocolo OLSR explica o alto número de pacotes descartados por falta de rota, conforme representado na Figura 6.6. Sob carga média, o LQ-OLSR diminui em 64,6% o número de pacotes sem rota. O descarte de pacotes por estouro de fila está ilustrado na Figura 6.7.

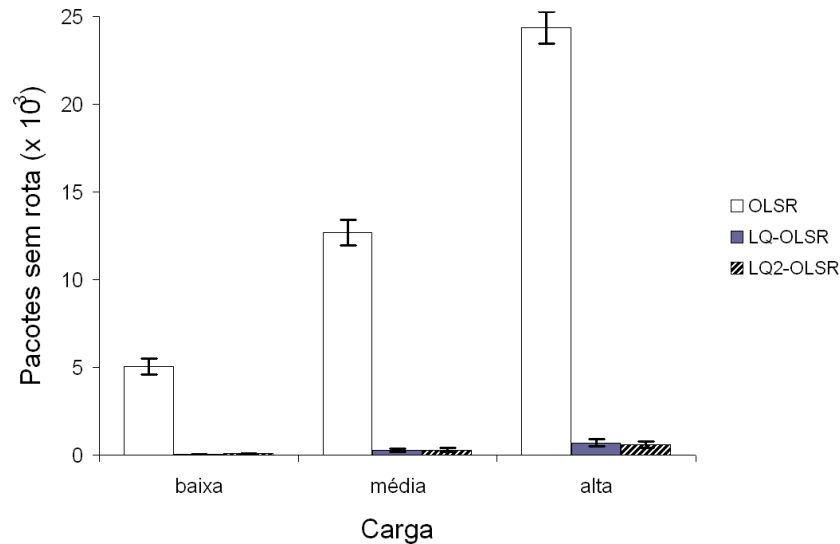


Figura 6.6: Descarte de pacotes por falta de rota em cenário com 50 nós.

Nos resultados obtidos envolvendo vazão, atraso, descarte de pacotes e quebra de enlaces, os protocolos LQ-OLSR e LQ2-OLSR (extensões de qualidade em 1 e 2 saltos, respectivamente) não apresentam diferenças significativas de valores, ou seja, têm o mesmo comportamento. No entanto, quando analisamos a estabilidade do roteamento, percebemos que o LQ2-OLSR possui uma taxa de mudanças de rota até 50% maior que o LQ-OLSR (Figura 6.8). Essa variação deve-se ao uso da métrica de qualidade cumulativa em 2 saltos no LQ2-OLSR, que requer nova seleção de rotas quando a qualidade de um dos enlaces mudou, afetando a métrica (soma das qualidades). Conforme esperado, o uso de uma métrica de qualidade local, não cumulativa, traz maior estabilidade de rotas ao LQ-OLSR.

Nos cenários com 50 nós, o *overhead* do protocolo de roteamento proposto foi de 1,38% em carga baixa, contra 1% do OLSR (Figura 6.9). Sob carga alta, os valores são de 0,85% para o LQ-OLSR e 0,52% do OLSR. O acréscimo é esperado devido à nova heurística de seleção de MPRs, que substitui a métrica de conjunto mínimo pela de nós com maior qualidade do enlace. No entanto, acreditamos que este aumento no *overhead* é pouco significativo diante do ganho em desempenho obtido pelo LQ-OLSR.

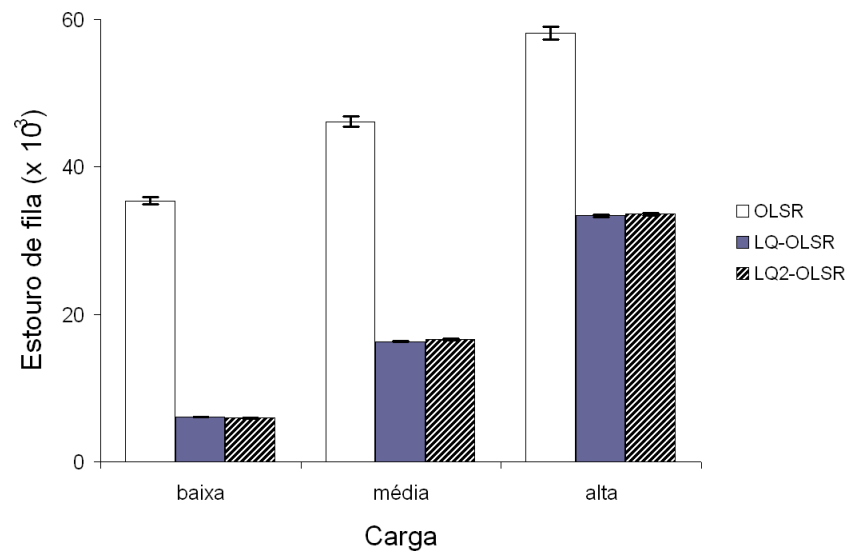


Figura 6.7: Descarte de pacotes por estouro de fila em cenário com 50 nós.

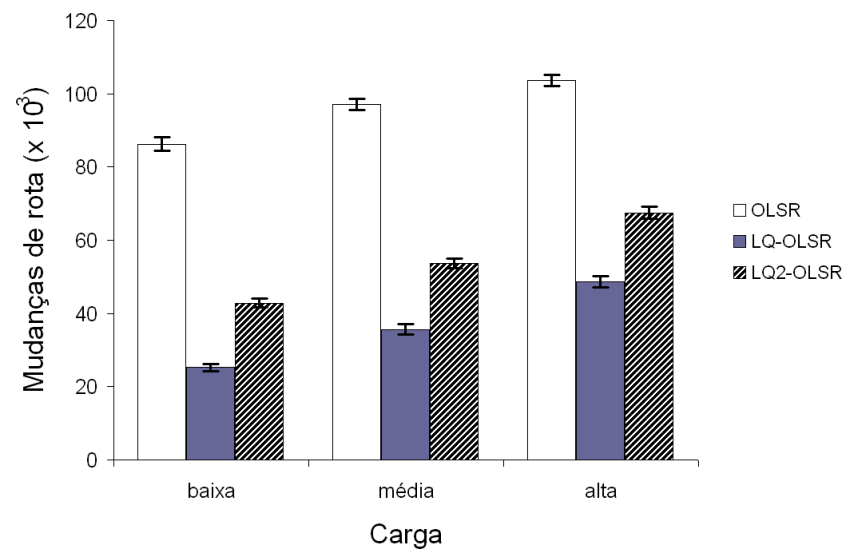


Figura 6.8: Mudanças de rota em cenário com 50 nós.

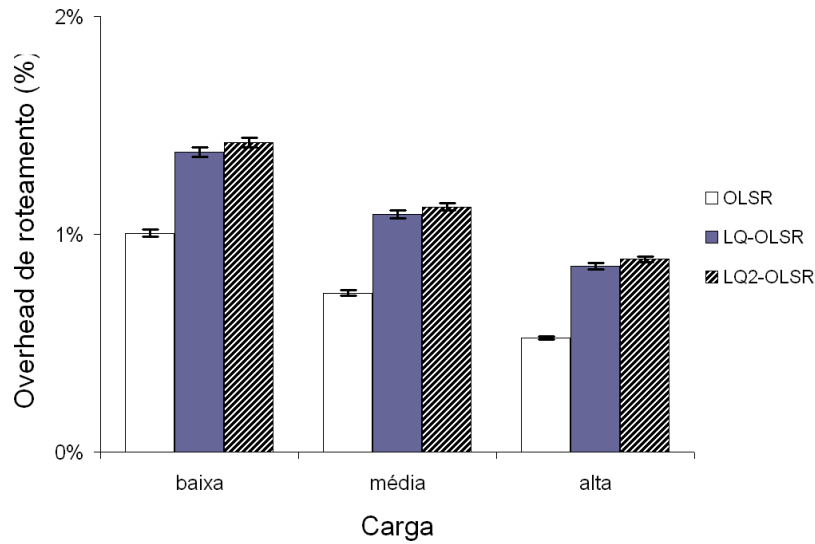


Figura 6.9: *Overhead* de roteamento em cenário com 50 nós.

Resultados do cenário II

Para testar a escalabilidade da solução proposta, realizamos experimentos com topologia de 100 nós distribuídos numa área de 2000m x 2000m (cenário II), usando os mesmos parâmetros de configuração. Neste caso, os ganhos obtidos foram de até 82,8% na vazão, 77,5% no atraso e 76,6% no descarte de pacotes em relação ao protocolo OLSR original, conforme os gráficos comparativos apresentados nas Figuras 6.10, 6.11, 6.12.

No cenário II, o protocolo LQ-OLSR conseguiu reduzir em até 87,8% a quantidade de pacotes descartados por falta de rota (Figura 6.13) e em 64,7% o descarte por estouro de fila (Figura 6.14), em comparação ao OLSR.

O número de enlaces perdidos nos protocolos LQ-OLSR e LQ2-OLSR é, no mínimo, 57% menor que no OLSR. Sob carga baixa, a diferença é de 75,1%, conforme a Figura 6.15. Os valores indicam ganhos na estabilidade dos enlaces e na confiabilidade da rede com o protocolo LQ-OLSR.

Assim como nos resultados obtidos nas simulações com 50 nós, os protocolos LQ-OLSR e LQ2-OLSR apresentam valores muito próximos para vazão, atraso e descarte de pacotes. Ao avaliarmos o número de mudanças de rota, constatamos que o LQ2-OLSR apresenta uma taxa até 28,9% maior que o LQ-OLSR (Figura 6.16). Novamente, essa variação demonstra o impacto do uso da métrica cumulativa em 2 saltos no roteamento, gerando maior instabilidade de rotas. Esse resultado corrobora nossa proposta de protocolo de roteamento utilizando uma métrica local, não cumulativa.

O acréscimo do *overhead* dos protocolos LQ-OLSR e LQ2-OLSR se repete nos experimentos com o cenário com 100 nós. Em carga baixa, obtivemos valores de 6,6% do

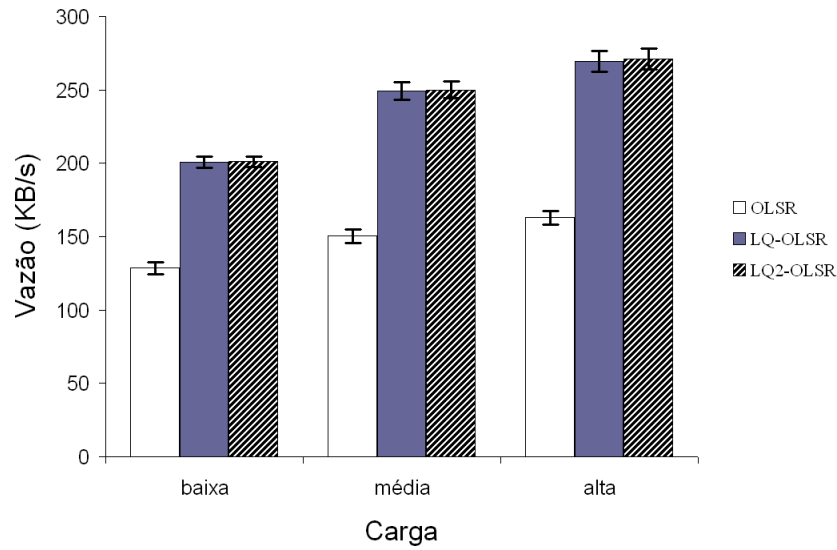


Figura 6.10: Vazão (*goodput*) em cenário com 100 nós.

LQ-OLSR contra 4,8% do OLSR (Figura 6.17). Sob carga alta, o *overhead* foi de 3,4% para o LQ-OLSR e 2,3% do OLSR. Novamente, consideramos o aumento pouco significativo quando comparado aos benefícios de desempenho obtidos pelo protocolo proposto.

Resumidamente, os ganhos do protocolo proposto no cenário com 100 nós são bastante significativos, porém menores que os apresentados com 50 nós. Isto é esperado devido à diferença de densidade de nós entre os cenários. O protocolo LQ-OLSR se beneficia do uso de múltiplos rádios por nó reduzindo a contenção, que é maior no cenário com maior densidade (cenário I, com 50 nós).

Outro fator a ser analisado é a limitação da diversidade de canais (3 canais) em função do número total de nós. Neste caso, acreditamos que com o barateamento das interfaces sem fio, o desempenho pode ser melhorado com a adição de mais receptores nos nós e maior número de canais, sobrepostos no caso do 802.11b ou ortogonais no 802.11a e 802.16.

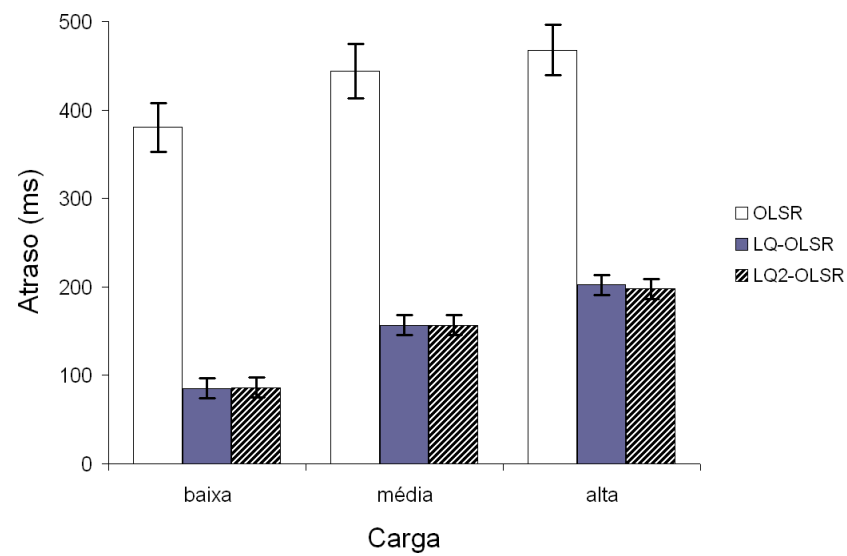


Figura 6.11: Atraso em cenário com 100 nós.

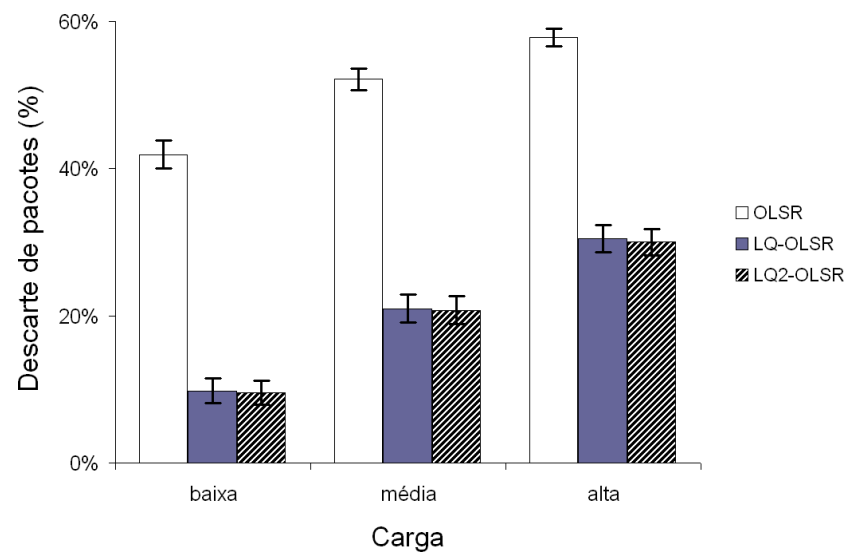


Figura 6.12: Descarte de pacotes em cenário com 100 nós.

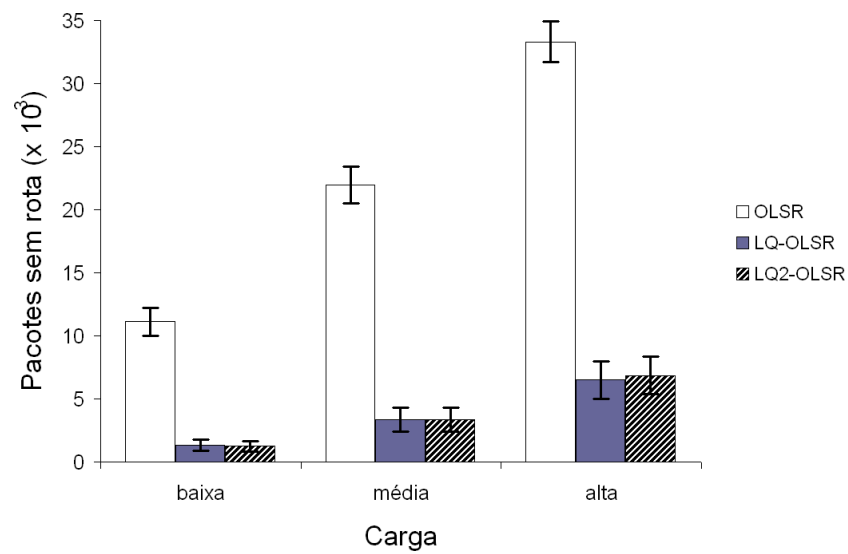


Figura 6.13: Descarte de pacotes por falta de rota em cenário com 100 nós.

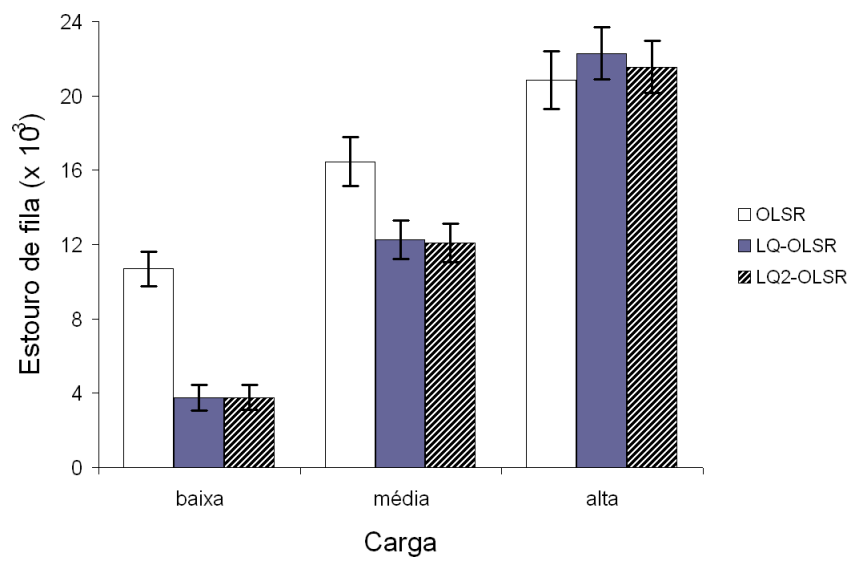


Figura 6.14: Descarte de pacotes por estouro de fila em cenário com 100 nós.

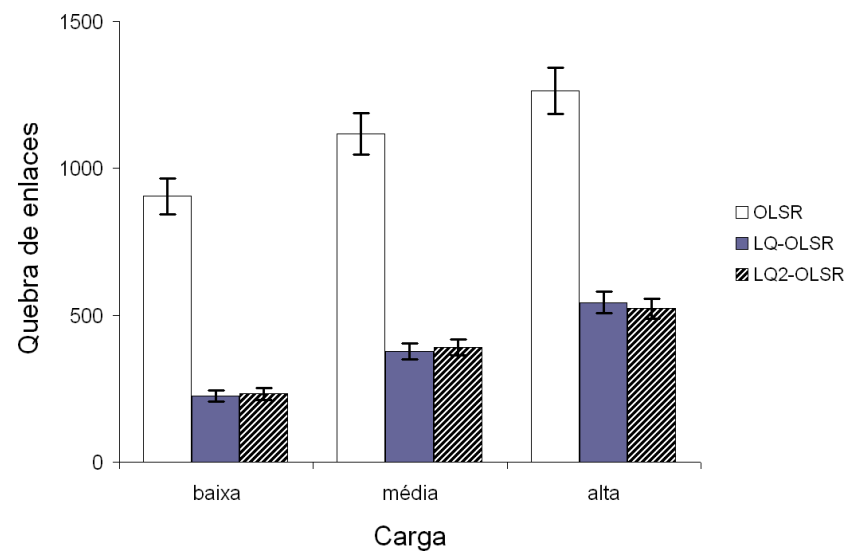


Figura 6.15: Quebra de enlaces em cenário com 100 nós.

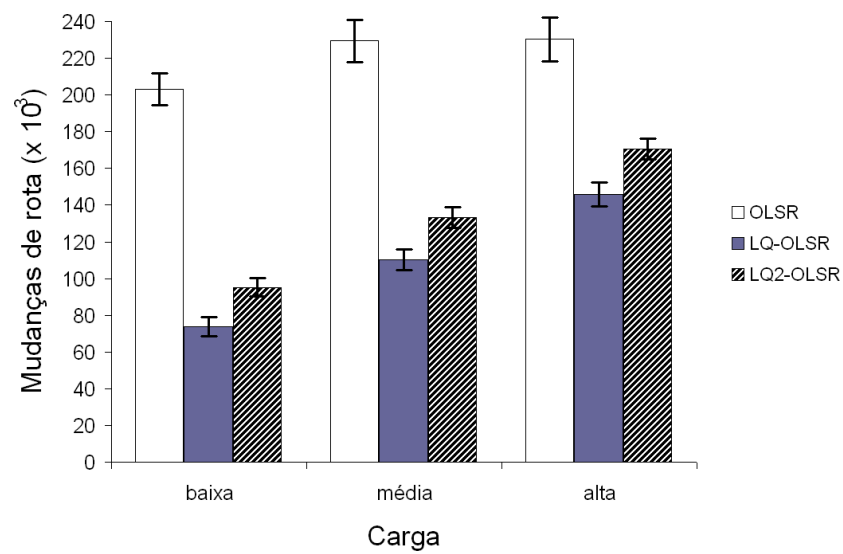


Figura 6.16: Mudanças de rota em cenário com 100 nós.

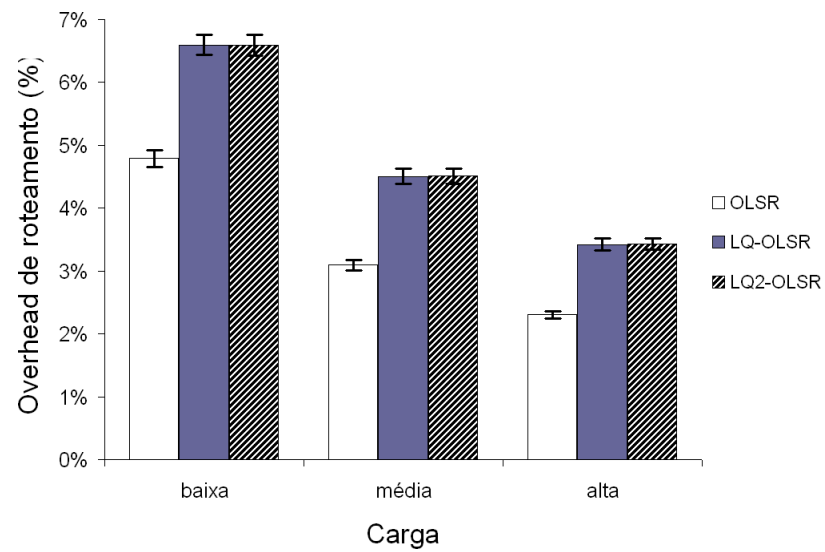


Figura 6.17: *Overhead* de roteamento em cenário com 100 nós.

Capítulo 7

Conclusão

Unindo flexibilidade e confiabilidade, as WMNs são uma tecnologia promissora para a nova geração de redes sem fio. Os cenários de aplicação vão desde a cobertura de um campus até a implantação de redes metropolitanas sem fio. Nesses cenários, a obtenção de QoS é um requisito fortemente desejável e, ao mesmo tempo, um grande desafio.

Apesar do avanço nas tecnologias de transmissão sem fio dos últimos anos, a capacidade de banda ainda é limitada se comparada com tecnologias cabeadas. A interferência entre transmissões simultâneas reduz a vazão disponível na rede à uma fração da capacidade máxima do enlace. O uso de múltiplos rádios por nó é uma estratégia eficaz para minimizar interferências e melhorar o desempenho das WMNs, e se justifica pela função de *backhaul* exercida por essas redes.

O projeto do protocolo de roteamento é um fator crucial no desempenho das redes *mesh* sem fio. Apesar de compartilharem características com as MANETs, as WMNs possuem requisitos próprios, tais como a topologia estática e o suporte a múltiplos rádios, que demandam protocolos específicos para essas redes. Alguns trabalhos propõem protocolos de roteamento para WMNs multi-rádio baseados em métricas de enlace cumulativas. No entanto, além de existirem limitações práticas para a computação dessas métricas, esse enfoque pode levar à instabilidade de rotas e comprometer a escalabilidade das WMNs.

Neste trabalho, apresentamos um protocolo de roteamento escalável com QoS dirigido para WMNs multi-rádio, onde os enlaces com maior qualidade são divulgados e utilizados no roteamento. Incorporamos uma métrica de qualidade de enlace na seleção de nós especiais de *relay* e suporte a múltiplos rádios por nó ao protocolo OLSR. A seleção de rotas combina a métrica de contagem de saltos do protocolo original e enlaces de melhor qualidade, encontrando caminhos através de enlaces melhores. Nosso protocolo, chamado LQ-OLSR (*Link Quality OLSR*), usa uma métrica de qualidade local, isotônica e fácil de calcular. Usamos uma abordagem de classe de qualidade para compor a métrica, o que preserva escalabilidade. Com a adição do suporte a múltiplos rádios por nó, tornamos o

LQ-OLSR compatível com a arquitetura multi-rádio.

Para avaliar o desempenho e a escalabilidade do protocolo, realizamos diversos experimentos no simulador NS-2 utilizando cenários com 50 e 100 nós. Os resultados obtidos nas simulações demonstram que uma maior distribuição de tráfego, por enlaces de melhor qualidade, juntamente com o uso de múltiplos rádios, traz melhorias significativas com relação à vazão, atraso e descarte de pacotes, com um aumento desprezível no *overhead* do protocolo. Essa estratégia é pouco efetiva em redes sem fio com um único rádio, pois gera maior interferência (contenção) entre os fluxos concorrentes.

Também fizemos simulações com uma versão do LQ-OLSR com métrica de qualidade cumulativa em 2 saltos, denominada LQ2-OLSR. O protocolo LQ-OLSR apresentou cerca de 50% menos mudanças de rotas que a versão LQ2-OLSR, favorecendo a estabilidade do roteamento. Esse fator é de grande importância, principalmente na implantação de redes *mesh* sem fio de larga escala.

O trabalho foi desenvolvido com uma alocação estática de canais, definida de forma aleatória. Como trabalho futuro, pretendemos estudar heurísticas de alocação de canais e integrá-las ao protocolo de roteamento proposto. Também estamos interessados em comparar a abordagem de métrica de qualidade utilizada em nosso protocolo com outras métricas, locais ou cumulativas.

Referências Bibliográficas

- [1] D. Aguayo, J. Bicket, S. Biswas, G. Judd, and R. Morris. A measurement study of a rooftop 802.11b mesh network. In *SIGCOMM 2004: Proc. of 2004 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications*, Portland, USA, set. 2004.
- [2] I. F. Akyildiz, X. Wang, and W. Wang. Wireless mesh networks: a survey. *Computer Networks*, 47(4):445–487, mar. 2005.
- [3] M. Alicherry, R. Bathia, and L. Li. Joint channel assignment and routing for throughput optimization in multi-radio wireless mesh networks. In *MobiCom'05: Proc. of 11th annual international conference on Mobile Computing and networking*, pages 58–72, Cologne, Germany, ago-set. 2005.
- [4] *Apple iPhone*. Disponível em: <http://www.apple.com/iphone/>. Acesso em set. 2007.
- [5] S. Avallone and I. F. Akyildiz. A channel assignment algorithm for multi-radio wireless mesh networks. In *WiMAN 2007: Proc. of 1st IEEE international workshop on Wireless Mesh and Ad Hoc Networks*, Honolulu, USA, ago. 2007.
- [6] H. Badis and K. A. Agha. Quality of service for Ad hoc Optimized Link State Routing Protocol (QOLSR). draft-badis-manet-qolsr-03.txt, IETF, mar. 2006.
- [7] M. Bahr. Proposed routing for IEEE 802.11s WLAN mesh networks. In *WICON'06: Proc. of 2nd annual international workshop on Wireless internet*, page 5, Boston, USA, ago. 2006.
- [8] *BelAir Networks*. Disponível em: <http://www.belairnetworks.com>. Acesso em set. 2007.
- [9] BelAir Networks. Capacity of Wireless Mesh Networks. White Paper, 2006. Disponível em: <http://www.belairnetworks.com>. Acesso em set. 2007.

- [10] C. T. Calafate, P. Manzoni, and M. P. Malumbres. Assessing the effectiveness of IEEE 802.11e in multi-hop mobile network environments. In *MASCOTS'04: Proc. of The IEEE Computer Society's 12th Annual International Symposium on Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunications Systems*, pages 205–212, Volendam, Holanda, 2004.
- [11] Cisco Systems. *Outdoor wireless network solution*. Disponível em: <http://www.cisco.com/go/wirelessmesh>. Acesso em set. 2007.
- [12] T. Clausen and P. Jacquet. Optimized Link State Routing Protocol (OLSR). IETF RFC 3626, IETF, out. 2003.
- [13] D. S. J. D. Couto, D. Aguayo, J. Bicket, and R. Morris. A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing. *Wireless Networks*, 11(4):419–434, 2005.
- [14] R. Draves, J. Padhye, and B. Zill. Comparison of routing metrics for static multi-hop wireless networks. In *SIGCOMM'04: Proc. of 2004 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications*, pages 133–144, Portland, USA, ago-set. 2004.
- [15] R. Draves, J. Padhye, and B. Zill. Routing in multi-radio, multi-hop wireless mesh networks. In *MobiCom'04: Proc. of 10th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 114–128, Philadelphia, USA, set-out. 2004.
- [16] Firetide Networks. Disponível em: <http://www.firetide.com>. Acesso em set. 2007.
- [17] GNU General Public License. Disponível em: <http://www.gnu.org/copyleft/gpl.html>. Acesso em set. 2007.
- [18] M. X. Gong, S. F. Midkiff, and S. Mao. A cross-layer approach to channel assignment in wireless ad hoc networks. *Mobile Networks and Applications*, 12(1):43–56, 2007.
- [19] P. Gupta and P. R. Kumar. The capacity of wireless networks. *IEEE Transactions on Information Theory*, IT-46:388–404, mar. 2000.
- [20] R. Gupta. *Quality of service in ad-hoc networks*. Doctoral thesis, University of California at Berkeley, Berkeley, USA, 2005. Disponível em: <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1144812>. Acesso em nov. 2007.
- [21] IEEE Standard for Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, IEEE 802.11 WG, ISO/IEC 8802-11:1999. IEEE Std. 802.11, 1999.

- [22] IEEE Std. 802.11e: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification/Amendment 8: Medium Access Control (MAC) Quality of Service Enhancements. IEEE Std. 802.11e, 2005.
- [23] *IEEE 802.11s TG, Status of Project IEEE 802.11s ESS Mesh Networking.* Disponível em: http://grouper.ieee.org/groups/802/11/Reports/tgs_update.htm. Acesso em set. 2007.
- [24] *IEEE 802.15 WPAN Task Group 5.* Disponível em: <http://www.ieee802.org/15/pub/TG5.html>. Acesso em set. 2007.
- [25] IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems. IEEE Std. 802.16-2004, 2004.
- [26] *IEEE 802.16's Relay Task Group.* Disponível em: <http://grouper.ieee.org/groups/802/16/relay/index.html>. Acesso em set. 2007.
- [27] D. B. Johnson, D. A. Maltz, and Y. Hu. The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks (DSR). IETF Internet Draft, IETF, jul. 2004.
- [28] P. Kyasanur and N. H. Vaidya. Routing and interface assignment in multi-channel multi-interface wireless networks. In *WCNC 2005: Proc. of IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, volume 4, pages 2051–2056, New Orleans, USA, mar. 2005.
- [29] P. Kyasanur and N. H. Vaidya. Routing and link-layer protocols for multi-channel multi-interface ad hoc wireless networks. *ACM Mobile Computing and Communications Review*, 10(1):31–43, jan. 2006.
- [30] *Microsoft Research Mesh Networks Project.* Disponível em: <http://research.microsoft.com/mesh/>. Acesso em set. 2007.
- [31] *MITRE Mobile Mesh.* Disponível em: <http://www.mitre.org/work/tech-transfer/mobilemesh/>. Acesso em set. 2007.
- [32] *Network Simulator NS-2.* Disponível em: <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>. Acesso em set. 2007.
- [33] *Nortel Networks. Wireless Mesh Network Solution.* Disponível em: http://products.nortel.com/go/solution.content.jsp?segId=0&parId=0&prod_id=47160&locale=en-US. Acesso em set. 2007.

- [34] R. Ogier, F. Templin, and M. Lewis. Topology Dissemination Based on Reverse-Path Forwarding (TBRPF). IETF RFC 3684, IETF, fev. 2004.
- [35] *OLPC: One Laptop Per Child Project*. Disponível em: <http://laptop.org>. Acesso em set. 2007.
- [36] *OOLSR - OLSR Implementation*. Disponível em: <http://hipercom.inria.fr/OOLSR/>. Acesso em set. 2007.
- [37] R. C. Paschoalino and E. R. M. Madeira. A scalable link quality routing protocol for multi-radio wireless mesh networks. In *WiMAN 2007: Proc. of 1st IEEE international workshop on Wireless Mesh and Ad Hoc Networks*, Honolulu, USA, ago. 2007.
- [38] R. C. Paschoalino and E. R. M. Madeira. Um protocolo de roteamento com QoS para redes mesh sem fio multi-rádio. In *SBRC 2007: 25 Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, Belém, Brasil, mai. 2007.
- [39] D. Passos, D. V. Teixeira, D. C. Muchaluat-Saade, L. C. S. Magalhães, and C. V. N. Albuquerque. Mesh network performance measurements. In *I2TS 2006: 5th international Information and Telecommunication Technologies Symposium*, pages 48–55, Cuiabá, Brasil, dez. 2006.
- [40] C. Perkins and E. Belding-Royer. Quality of service for Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing. I-D draft-perkins-manet-aodvqos-02.txt (work in progress), IETF, fev. 2003.
- [41] C. Perkins, E. Belding-Royer, and S. Das. Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing. IETF RFC 3561, IETF, jul. 2003.
- [42] *Projeto ReMesh. Rede Mesh de Acesso Universitário Faixa Larga sem Fio*. Disponível em: <http://mesh.ic.uff.br>. Acesso em set. 2007.
- [43] Y. Qu, C.-H. Lung, and A. Srinivasan. Multi-channel OLSR with dedicated control interface. In *SPECTS'06: international Symposium on Performance Evaluation of Computer and Telecommunication Systems*, pages 155–162, Calgary, Canada, ago. 2006.
- [44] A. Raniwala and T. Chiueh. Architecture and algorithms for an IEEE 802.11-based multi-channel wireless mesh network. In *Infocom 2005: Proc. of 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, pages 2223–2234, Miami, USA, mar. 2005.

- [45] D. M. Shila and T. Anjali. Load-aware traffic engineering for mesh networks. In *WiMAN 2007: Proc. of 1st IEEE international workshop on Wireless Mesh and Ad Hoc Networks*, Honolulu, USA, ago. 2007.
- [46] J. L. Sobrinho. Network routing with path vector protocols: Theory and applications. In *ACM SIGCOMM: Proc of annual conference of the Special Interest Group on Data Communication*, pages 49–60, Karlsruhe, Germany, ago 2003.
- [47] A. P. Subramanian, M. M. Buddkilot, and S. Miller. Interference aware routing in multi-radio wireless mesh networks. In *WiMesh 2006: Proc.of. 2nd IEEE workshop on Wireless Mesh Networks*, pages 55–63, Reston, USA, set. 2006.
- [48] J. Tang, G. Xue, and W. Zhang. Interference-aware topology control and QoS routing in multi-channel wireless mesh networks. In *MobiHoc'05: Proc. of 6th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*, pages 68–77, Urbana-Champaign, USA, mai. 2005.
- [49] T.-J. Tsai and J.-W. Chen. IEEE 802.11 MAC protocol over wireless mesh networks: problems and perspectives. In *AINA 2005: 19th international conference on Advanced Information Networking and Applications*, volume 2, pages 60–63, Tamkang University, Taiwan, mar. 2005.
- [50] S. Waharte, R. Boutaba, Y. Iraqui, and B. Ishibashi. Routing protocols in wireless mesh networks: challenges and design considerations. *Multimedia Tools and Applications*, 29(3):285–303, jun. 2006.
- [51] *Wikipedia. Mobile Ad Hoc Network*. Disponível em: http://en.wikipedia.org/wiki/Mobile_ad-hoc_network. Acesso em set. 2007.
- [52] Q. Xue and A. Ganz. Qos routing for mesh-based wireless lans. *International Journal of Wireless Information Networks*, 9(3):179–190, jul. 2002.
- [53] Y. Yang, J. Wang, and R. Kravets. Designing routing metrics for mesh networks. In *WiMesh 2005: IEEE Workshop on Wireless Mesh Networks*, Santa Clara, USA, set. 2005.