



Universidade Federal do Ceará
Centro de Ciências
MDCC - Mestrado e Doutorado em Ciência da Computação

**Análise sobre o impacto da densidade veicular, da
carga da rede e da mobilidade no desempenho de
protocolos de roteamento para Redes Veiculares**

Dissertação de Mestrado
Bruno Góis Mateus

Orientadora: Rossana Maria de Castro Andrade, PhD.
Co-Orientadora: Carina Teixeira de Oliveira, M.Sc.

Fortaleza - CE
Dezembro - 2010

Bruno Góis Mateus

Análise sobre o impacto da densidade veicular, da carga da rede e da mobilidade no desempenho de protocolos de roteamento para Redes Veiculares

Dissertação de Mestrado submetida à Coordenação do MDCC - Mestrado e Doutorado em Ciência da Computação da Universidade Federal do Ceará como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciência da Computação.

Orientadora: Rossana Maria de Castro Andrade, PhD.

Co-Orientadora: Carina Teixeira de Oliveira, M.Sc.

Fortaleza - CE

Dezembro - 2010

Dedico esta dissertação
à minha família.

Agradecimentos

Para alcançarmos um objetivo lutamos e nos dedicamos e o momento ideal para avaliarmos se tudo valeu a pena é após a conclusão do trabalho, onde botamos um ponto final em mais uma etapa de nossas vidas. Assim como os grandes atletas que ao ganhar um ouro olímpico olham para trás e lembram os momentos de muito trabalho, dedicação, desgaste e até privação, posso dizer que valeu a pena. Contudo, se cheguei até aqui foi graças à ajuda de várias pessoas. Por essa razão, agradecê-las é o mínimo que posso fazer.

Em primeiro lugar, agradeço toda minha família, sem exceções, mas, principalmente aos meus pais, Otacílio e Liliane, e aos meus avós, William e Lourdes, que ao longo dessa caminhada sempre me apoiaram, independentemente dos conflitos que surgiram. Agradeço também aos ensinamentos passados, que me ajudaram a construir meu caráter e também, todo o esforço realizado por eles para me proporcionar uma educação de qualidade, imprescindível para chegar até aqui. Também agradeço aos meus irmãos, Rebecca e Renan, e aos meus primos, Cincinati e Berlioz, que sempre me apoiaram durante essa jornada.

Agradeço especialmente a Milena, que sempre esteve ao meu lado durante essa jornada e que me ajudou de diversas formas, motivando-me nos momentos desanimadores, escutando meus desabafos, aconselhando-me quando quis agir impulsivamente e corrigindo meu texto. Agradeço por tornar essa caminhada mais agradável.

Agradeço a minha professora e orientadora Rossana, por acreditar e apostar na minha capacidade e no potencial deste trabalho, proporcionando meios para torná-lo um trabalho científico. Também agradeço por toda a dedicação e, principalmente, a paciência no decorrer de todo o mestrado. Não poderia deixar de agradecer pelos "puxões de orelha" devidamente dados durante esse período, que me fizeram amadurecer pessoal e profissionalmente.

Agradeço de forma especial a minha co-orientadora Carina, que desde o primeiro momento confiou e apostou no meu potencial. Também agradeço pelos inúmeros conselhos dados e pelas diversas lições de como realizar um trabalho científico. Agra-

deço pela troca de experiências, fonte riquíssima de aprendizado e amadurecimento. Agradeço por toda dedicação durante todo o mestrado, que foi indispensável durante essa jornada.

Agradeço também aos meus amigos, João Borges e Carlos Giovanni, que me ajudaram bastante com o NS2 e que dessa forma me fizeram ganhar algumas horas de sono. Também agradeço aos meus amigos Michel, Camila Helena, Lincoln, Márcio, Bosco e João Marcelo pelos conselhos dados durante essa caminhada.

Agradeço a todos os professores do MDCC pelo conhecimento compartilhado e pelo exemplo de dedicação e comprometimento. Aos servidores do GREat por todo o suporte necessário para realização das minhas atividades, em especial à Christiane, Danilo, Darilu, Liliane e Sr. Adir.

Aos professores Raimundo José de Araújo Macêdo, José Neuman de Souza e Joaquim Celestino Júnior pela presença na banca examinadora.

Por fim, agradeço à FUNCAP pelo financiamento da pesquisa.

O homem nunca sabe do que é capaz, até que o tenta.

Charles Dickens

Resumo

Os avanços alcançados na computação móvel e na comunicação sem fio levaram ao desenvolvimento do Sistema Inteligente de Transporte, onde se pode destacar as redes veiculares. Nelas, o roteamento é uma tarefa desafiadora devido à alta mobilidade dos nós, à instabilidade dos enlaces sem-fio e a diversidade de cenários. Por essa razão, diversos protocolos de roteamento foram projetados com o objetivo de solucionar um ou mais problemas específicos de cada cenário. Entretanto, apesar de existirem várias soluções propostas para o problema do roteamento em redes veiculares, nenhuma delas alcançou um desempenho satisfatório em mais de um cenário, como urbano e rodovia. Sendo assim, nesta dissertação, analisamos através de simulações o impacto da densidade, da carga da rede e da mobilidade no desempenho de um protocolo de roteamento para fornecer diretrizes para os projetistas de redes veiculares desenvolverem protocolos de roteamento eficientes, capazes de se adaptar aos cenários urbano e de rodovia. Para alcançar esse objetivo, quatro protocolos existentes na literatura foram avaliados nos cenários urbano e de rodovia, dois deles voltados diretamente para redes veiculares e os outros dois tradicionais de redes *ad hoc*.

Palavras-chave: Redes Veiculares; Protocolos de Roteamento; Análise de desempenho; Cenários de redes veiculares.

Abstract

Advances in mobile computing and wireless communications have made possible the development of the Intelligent Transportation System, which contain the vehicular networks. There, routing is a challenging task due to the high node mobility, the instability of wireless links and the diversity of scenarios. For this reason, several routing protocols have been designed with the goal of solving one or more specific problems of each scenario. However, although there are several proposed solutions to the routing problem in vehicular networks, none of them has achieved a satisfactory performance in more than one scenario, such as urban and highway. Thus, in this work, we first analyze with simulations the impact of density, the network load and the mobility pattern in the performance of routing protocols for these networks. Then, we provide new directions for designing efficient vehicular network routing protocols, able to adapt to urban and highway scenarios. To achieve this goal, four existing protocols were evaluated in urban and highway scenarios.

Keywords: Vehicular Networks; Routing protocols; Performance Analysis; Vehicular Network Scenarios.

Sumário

1	Introdução	18
1.1	Contexto	18
1.2	Motivação	22
1.3	Objetivo e Metodologia	24
1.4	Estrutura da dissertação	26
2	Redes veiculares	28
2.1	Histórico	28
2.2	Características Principais	29
2.2.1	Arquitetura	30
2.2.2	Recursos	31
2.2.3	Mobilidade dos Nós	32
2.2.4	Dinamicidade da Rede	33
2.2.5	Conectividade da Rede	34
2.2.6	Cenários	35
2.3	Aplicações	36
2.3.1	Aplicações de Segurança	37
2.3.2	Aplicações de Conforto	40
2.4	Padrão WAVE	42
2.5	Conclusão	44
3	Roteamento em Redes Veiculares	45
3.1	Histórico	45
3.2	Características Principais	48
3.3	Protocolos de Roteamento	51
3.3.1	GSR	51
3.3.2	SAR	52
3.3.3	A-STAR	53
3.3.4	GPCR	54
3.3.5	MURU	55

3.3.6	CAR	57
3.3.7	ROMSGP	58
3.3.8	AVR	59
3.3.9	VADD	60
3.3.10	Comparação entre os Protocolos	62
3.4	Conclusão	65
4	Modelo de Mobilidade	66
4.1	Simulação de Tráfego	66
4.2	Modelo de Mobilidade	68
4.2.1	Realismo de Interações Veículo a Veículo	72
4.2.2	Realismo das Interações entre Fluxos	75
4.3	<i>Simulation of Urban MObility</i> (SUMO)	78
4.4	Conclusão	80
5	Análise das Simulações	82
5.1	Limitações dos Protocolos de Roteamento	82
5.2	A Importância da Densidade Veicular	85
5.3	Modelo da Rede	86
5.4	Ambiente de Simulação	87
5.4.1	Cenários	88
5.4.2	Protocolos de Roteamento Simulados	89
5.4.3	Mobilidade	90
5.4.4	Parâmetros do Simulador de Rede	91
5.5	Resultados	93
5.5.1	Pacotes de Controle	96
5.5.2	Taxa de Entrega	106
5.5.3	Atraso fim a fim	117
5.6	Discussão	123
5.7	Conclusão	124
6	Conclusões e Trabalhos Futuros	125
6.1	Contribuições	125
6.2	Trabalhos Futuros	127
	Referências Bibliográficas	127

Lista de Figuras

1.1	Exemplo de cenário de rede <i>ad hoc</i> veicular [C2CCC 2009].	19
1.2	Crescimento da frota de veículos no Brasil [Denatran 2010b].	21
2.1	Tipos de arquiteturas para Redes Veiculares.	31
2.2	Exemplos de modelos de mobilidade.	33
2.3	Exemplos de cenários urbanos.	36
2.4	Exemplos de cenários de rodovia.	37
2.5	Cenário em que o sistema EEBL é utilizado. [Mohammad S. Almalag 2009].	39
2.6	Pilha de protocolos 802.11p WAVE [Rafael Alves et al. 2009].	43
3.1	Visão geral do funcionamento de um protocolo de roteamento para redes veiculares. Figura adaptada de [Guoqing et al. 2008].	49
3.2	Agrupamento dos veículos no ROMSGP.	59
3.3	Modo de interseção do VADD.	61
4.1	Esquema geral de simulação em redes veiculares.	67
4.2	Esquema geral de simulação no SUMO [Gongjun Yan and Weigle 2009].	79
5.1	Mapa do cenário urbano [openstreetmap 2009a].	88
5.2	Mapa do cenário de rodovia.	89
5.3	Quantidade de pacotes de controle enviados por cada protocolo de roteamento em função da densidade de veículos no cenário urbano.	98
5.4	Quantidade de pacotes de controle enviados por cada protocolo de roteamento em função da densidade de veículos no cenário de rodovia.	99
5.5	Quantidade de pacotes de controle enviados em função do tipo de pacote de controle, do cenário e do protocolo de roteamento. Rede composta por 100 veículos e 50% de nós fonte.	100
5.6	Quantidade de pacotes de controle enviados por cada protocolo de roteamento em função do número de fontes no cenário urbano.	103
5.7	Quantidade de pacotes de controle enviados por cada protocolo de roteamento em função do número de fontes no cenário rodovia.	104

5.8	Taxa de entrega para cada protocolo de roteamento em função da densidade de veículos no cenário urbano.	107
5.9	Taxa de entrega para cada protocolo de roteamento em função da densidade de veículos no cenário de rodovia.	108
5.10	Taxa de entrega para cada protocolo de roteamento em função do número de fontes no cenário urbano.	114
5.11	Taxa de entrega para cada protocolo de roteamento em função do número de fontes no cenário de rodovia.	115
5.12	Atraso fim a fim de cada protocolo de roteamento em função da densidade de veículos no cenário urbano.	119
5.13	Atraso fim a fim de cada protocolo de roteamento em função da densidade de veículos no cenário de rodovia.	120
5.14	Atraso fim a fim de cada protocolo de roteamento em função do número de fontes no cenário urbano.	121
5.15	Atraso fim a fim de cada protocolo de roteamento em função do número de fontes no cenário de rodovia.	122

Lista de Tabelas

2.1	Características dos diversos tipos de redes <i>ad hoc</i> [Francisco J. Ros et al. 2009].	29
3.1	Classificação dos protocolos quanto as características da abordagem.	62
3.2	Classificação dos protocolos quanto aos requisitos.	64
4.1	Taxa de entrega do AODV e GPSR. Adaptada de [Naumov et al. 2006]	69
5.1	Comparação entre o MURU e o ROMSGP.	89
5.2	Parâmetros de cada tipo de veículo.	91
5.3	Parâmetros de simulação para o cenário urbano.	91
5.4	Parâmetros de simulação para o cenário de rodovia.	92
5.5	Comparação do número de pacotes de controle enviados no cenário urbano e de rodovia com 10% de nós fonte.	101
5.6	Comparação do número de pacotes de controle enviados no cenário urbano e de rodovia com 30% de nós fonte.	101
5.7	Comparação do número de pacotes de controle enviados no cenário urbano e de rodovia com 50% de nós fonte.	101
5.8	Comparação do número de pacotes de controle enviados no cenário urbano e de rodovia com 100 veículos.	105
5.9	Comparação do número de pacotes de controle enviados no cenário urbano e de rodovia com 300 veículos.	105
5.10	Comparação do número de pacotes de controle enviados no cenário urbano e de rodovia com 500 veículos.	105
5.11	Comparação das taxas de entrega alcançadas em situações extremas da rede com 10% de nós fonte no cenário urbano.	110
5.12	Comparação das taxas de entrega alcançadas em situações extremas da rede com 10% de nós fonte no cenário de rodovia.	110
5.13	Comparação das taxas de entrega alcançadas em situações extremas da rede com 30% de nós fonte no cenário urbano.	110
5.14	Comparação das taxas de entrega alcançadas em situações extremas da rede com 30% de nós fonte no cenário de rodovia.	111

5.15	Comparação das taxas de entrega alcançadas em situações extremas da rede com 50% de nós fonte no cenário urbano.	112
5.16	Comparação das taxas de entrega alcançadas em situações extremas da rede com 50% de nós fonte no cenário de rodovia.	113
5.17	Resumo dos resultados obtidos em relação à taxa de entrega no cenário urbano.	117
5.18	Resumo dos resultados obtidos em relação à taxa de entrega no cenário de rodovia.	117

Lista de Algoritmos

5.1	Algoritmo para corrigir o comportamento dos veículos que não iniciam a sua movimentação no começo da simulação.	94
5.2	Algoritmo para corrigir o comportamento dos veículos que já alcançaram o seu destino.	94

Lista de Abreviaturas e Siglas

AODV	<i>Ad hoc On Demand Distance Vector</i>
AVR	<i>Adaptive Routing Protocols for Vehicular Ad Hoc Networks</i>
AGF	<i>Advanced Greedy Forward</i>
A-STAR	<i>Anchor-based Street and Traffic Aware Routing</i>
AAA	<i>American Automobile Association</i>
ABR	<i>Associativity-Based Routing</i>
C2CCC	<i>Car2car Communication Consortium</i>
CAR	<i>Connectivity-Aware Routing</i>
CCH	<i>Control Channel</i>
CCA	<i>Cooperative Collision Avoidance</i>
CBR	<i>Constant Bit Rate</i>
CSM	<i>Constant Speed Motion</i>
D-VADD	<i>Direction first probe-VADD</i>
DSR	<i>Dynamic Source Routing</i>
EPFL	<i>Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne</i>
EEBL	<i>Emergency Electronic Brake Light</i>
EDD	<i>Expected Disconnection Degree</i>
FTM	<i>Fluid Traffic Motion Model</i>
GPCR	<i>Greedy Perimeter Coordinator Routing</i>
GPSR	<i>Greedy Perimeter Stateless Routing</i>
GSR	<i>Geographic Source Rating</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
H-VADD	<i>Hybrid probe VADD</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IPEA	<i>Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada</i>
IDM	<i>Intelligent Driver Model</i>
IDM-IM	<i>Intelligent Driver Model with Intersection Management</i>
ITS	<i>Intelligent Transportation Systems</i>
IETF	<i>Internet Engineering Task Force</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>

LET	<i>Link Expiration Time</i>
LAR	<i>Location-Aided Routing</i>
L-VADD	<i>Location first probe-VADD</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
MOBIL	<i>Minimizing Overall Braking Induced by Lane-changes</i>
MANET	<i>Mobile Ad Hoc Networks</i>
MURU	<i>Multi-hop Routing Protocol for Urban VANETs</i>
NS	<i>Network Simulator</i>
OICA	Organisation Internationale des Constructeurs d' Automobiles
OEM	<i>Original Equipment Manufacturer</i>
PER	<i>Packet Error Ratio</i>
PGB	<i>Preferred Broadcast Group</i>
RWP	<i>Random Waypoint</i>
ROMSGP	<i>Receive On Most Stable Group-Path</i>
ROMSP	<i>Receive On Most Stable Path</i>
RREQ	<i>Route Request</i>
RREP	<i>Route Reply</i>
RERR	<i>Route Error</i>
P2P	<i>Peer-to-Peer</i>
RLS	<i>Reactive Location Service</i>
RSSF	Redes de Sensores Sem Fio
RMSF	Redes Mesh Sem Fio
SAR	<i>Spatial Aware Routing</i>
SCH	<i>Service Channel</i>
SUMO	<i>Simulation of Urban MObility</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
VADD	<i>Vehicle-Assisted Data Delivery</i>
V2V	<i>Vehicle-to-Vehicle</i>
V2I	<i>Vehicle-to-infrastructure</i>
VANET	<i>Vehicular Ad Hoc Networks</i>
WAVE	<i>Wireless Access in the Vehicular Environment</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>
WME	<i>Wireless Management Entity</i>
WSMP	<i>Wireless Short Message Protocol</i>

Capítulo 1

Introdução

Esta dissertação apresenta uma análise sobre o impacto da densidade veicular, da carga da rede e da mobilidade dos nós no desempenho de protocolos de roteamento para Redes Veiculares.

Na Seção 1.1 é apresentada a contextualização deste trabalho com relação aos problemas que buscamos solucionar. Na Seção 1.2 discutimos a motivação que impulsionou o desenvolvimento desta pesquisa. Em seguida, na Seção 1.3 são expostos os principais objetivos a serem alcançados com este trabalho, sendo a metodologia utilizada também discutida nesta Seção. Por fim, na Seção 1.4 é apresentada a estrutura dos capítulos na qual esta dissertação está organizada.

1.1 Contexto

É cada vez mais clara a importância da Tecnologia da Informação (TI) no desenvolvimento social, econômico e cultural de uma nação. Neste contexto, existe uma demanda crescente do usuário de permanecer conectado onde quer que esteja e a qualquer momento, até mesmo quando está em movimento. As redes sem fio desempenham um papel fundamental nessa tarefa, possibilitando que o usuário se conecte em sua casa, no trabalho, no shopping e, até mesmo, no veículo. Este último cenário vem recebendo bastante atenção dos pesquisadores e da indústria automobilística, que estudam soluções de redes capazes de integrar a nova geração de redes sem fio em veículos automotores. O objetivo é desenvolver um Sistema de Transporte Inteligente (*Intelligent Transportation Systems* - ITS) capaz de integrar diferentes veículos e possibilitar que aplicações com diferentes requisitos sejam atendidas satisfatoriamente. Para alcançar este objetivo foram criadas as redes veiculares [Hartenstein and Laberteaux 2008].

Como ilustrado na Figura 1.1, em um cenário de redes veiculares existem dois tipos de nós: veículo automotor e infra-estrutura fixa [Bernsen and Manivannan 2008]. Os veículos automotores são nós móveis como carros, caminhões e ônibus equipados com um dispositivo de comunicação sem fio. A infra-estrutura fixa é fornecida pelos pontos de acesso posicionados nas margens de ruas e estradas. Os veículos automotores podem se comunicar entre si, veículo-veículo (*vehicle-to-vehicle* - V2V), ou com pontos de acesso fixos, veículo-infra-estrutura (*vehicle-to-infrastructure* - V2I).

As redes veiculares se diferenciam das outras redes sem fio não só pela natureza dos nós, mas também pelo fato das trajetórias dos nós móveis acompanharem os limites das vias públicas de acesso.

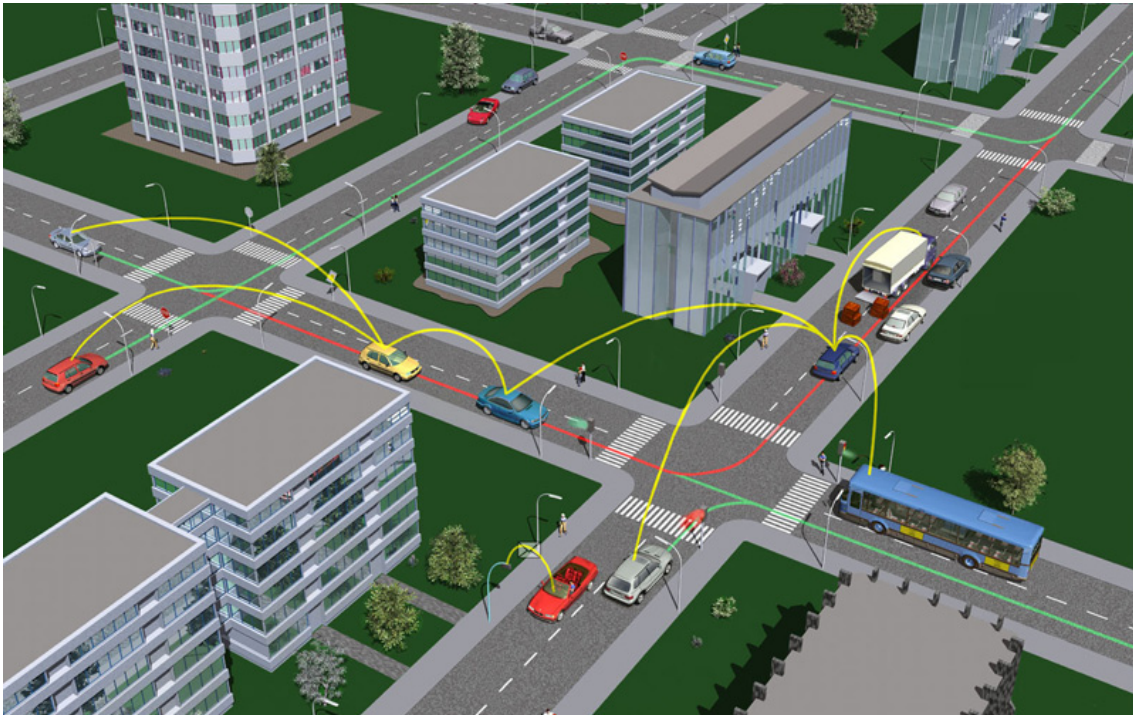


Figura 1.1: Exemplo de cenário de rede *ad hoc* veicular [C2CCC 2009].

Atualmente, alguns pesquisadores referem-se às redes veiculares como redes *ad hoc* veiculares (*Vehicular Ad hoc NETWORKS* - VANETs). Esse termo foi originalmente adotado para refletir a natureza altamente dinâmica dessas redes. Entretanto, na literatura, o termo rede *ad hoc* está associado ao roteamento *unicast*. Por essa razão, existe atualmente um debate entre os pioneiros desse campo de pesquisa para redefinir o acrônimo VANET retirando a ênfase em redes *ad hoc*. Como ainda não existe um consenso sobre essa discussão, este trabalho adotará o termo de redes veiculares como a tecnologia de comunicação V2V e V2I baseada na tecnologia de redes sem-fio.

Para possibilitar essa comunicação entre os veículos foram necessários avanços nas tecnologias sem fio, em especial no padrão IEEE 802.11, impulsionado pelo crescente interesse das universidades e indústrias pelas redes veiculares, que fez o IEEE iniciar um processo de padronização das comunicações em redes veiculares. Esse trabalho está sendo desenvolvido dentro do grupo de trabalho IEEE 802.11. O padrão que está sendo desenvolvido é conhecido como IEEE 802.11p WAVE (*Wireless Access in the Vehicular Environment*). A arquitetura WAVE é definida em seis documentos: IEEE P1609.1, IEEE P1609.2, IEEE P1609.3, IEEE P1609.4, IEEE 802.11 e IEEE 802.11p. Esses documentos descrevem todas as camadas da pilha de protocolo WAVE. O principal objetivo da arquitetura WAVE é prover a comunicação entre veículos (V2V) e entre veículos e infra-estrutura (V2I). Entretanto, para alcançar esse objetivo é necessário que haja a interoperabilidade entre todos os dispositivos fabricados. Além disso, o padrão deve ser capaz de realizar as comunicações em curtos intervalos de tempo, devido à alta velocidade que os veículos podem atingir. No Capítulo 2 vamos tratar mais detalhadamente da arquitetura WAVE.

O grande sucesso das redes veiculares deve-se então a esses avanços e à variedade de aplicações que podem ser oferecidas nestas redes. De acordo com [Li and Wang 2007], essas aplicações podem ser divididas em duas categorias, aplicações voltadas para segurança e aplicações voltadas para o conforto. No Capítulo 2 discutiremos com mais detalhes essas aplicações e suas características.

Na academia, cada vez mais pesquisas sobre redes veiculares vêm sendo desenvolvidas em parceria com a indústria. Vários consórcios foram criados com parceria entre universidades e grandes montadoras de veículos. Dentre estes consórcios, pode-se destacar o *Car2Car Communication Consortium* [C2CCC 2009], uma organização sem fins lucrativos criada pelos fabricantes europeus de veículos (e.g., Audi, Volvo, Volkswagen e Renault) e aberta para a participação de fornecedores, órgãos de pesquisa e outros parceiros. Do lado acadêmico, a *École Polytechnique Fédérale de Lausanne* (EPFL) é um dos parceiros desse consórcio. Os principais objetivos do consórcio são: criar e estabelecer um padrão para sistemas de comunicação inter-veículos na Europa baseado em componentes sem fio; garantir em nível europeu a operabilidade desses sistemas; criar aplicações de segurança ativa através de especificações; prototipar e demonstrar sistemas inter-veículos; além de impulsionar uma padronização mundial e desenvolver estratégias de implantação realista e modelos de negócios objetivando acelerar a penetração no mercado.

Além de todo o interesse acadêmico e comercial existente em relação às redes

veiculares, alguns dados estatísticos que reforçam a previsão de crescimento das redes veiculares. Segundo estatísticas da Organização Internacional dos Fabricantes de Automóveis (*Organisation Internationale des Constructeurs d'Automobiles* - OICA) [OICA 2009], a tendência da frota mundial de veículos é continuar crescendo, o que conseqüentemente aumentará a atratividade das redes veiculares e impulsionará o desenvolvimento de novas aplicações. No Brasil, por exemplo, como ilustrado no gráfico da Figura 1.2, a frota de veículos cresceu 40,51% desde 2005, correspondendo hoje a uma frota de aproximadamente 61 milhões de veículos [Denatran 2010b].



Figura 1.2: Crescimento da frota de veículos no Brasil [Denatran 2010b].

Outro fator motivador para o desenvolvimento das redes veiculares são os grandes investimentos realizados, principalmente por órgãos governamentais, para aumentar a segurança no trânsito. De acordo com o relatório do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), o Brasil gastou no ano de 2005 cerca de 22 bilhões de reais - 1,2% do Produto Interno Bruto (PIB) - com acidentes de trânsito [IPEA 2006]. Outro estudo, este realizado pela *American Automobile Association*(AAA) [AAA 2009] e divulgado em [CNNMoney 2008], apresentou que o gasto anual com acidentes de trânsito nos Estados Unidos chega a ser de 1.051 dólares por pessoa, atingindo o valor de 164,2 bilhões de dólares no total. Além disso, o mesmo estudo mostra que os congestionamentos geram custos de cerca de 70 bilhões de dólares anualmente ao estado americano.

Por ser uma tecnologia emergente, muitas aplicações já foram desenvolvidas para ambientes de redes veiculares. Grande parte dessas aplicações sugere a existência de uma comunicação de múltiplos saltos. Por isso, surge a necessidade de um protocolo

de roteamento eficiente capaz de lidar com a topologia altamente dinâmica da rede e as frequentes desconexões. Além disso, outra característica inerente das redes veiculares que contribui para tornar ainda mais desafiador o desenvolvimento de um protocolo de roteamento é a variedade de cenários. Conforme apresentaremos em maiores detalhes nos próximos capítulos, nas redes veiculares o cenário é uma característica que influencia diretamente a mobilidade dos nós [Viriyasitavat et al. 2009]. Logo, independentemente do cenário onde um dado veículo esteja presente, é necessário que o protocolo de roteamento opere de forma satisfatória [Bernsen and Manivannan 2008], devendo ser inclusive tolerante às mudanças de cenário.

1.2 Motivação

Devido às semelhanças entre as redes móveis *ad hoc* e as redes veiculares, várias foram as tentativas de solucionar o desafio do roteamento nas redes veiculares utilizando protocolos de roteamento típicos das redes móveis *ad hoc*. Grande parte desses protocolos de roteamento foi proposta recentemente ao *Internet Engineering Task Force* (IETF) [Taleb et al. 2007]. Esses protocolos são classificados em protocolos pró-ativos, reativos e híbridos.

Os protocolos pró-ativos têm como principal característica o fato de que os nós mantêm as informações sobre a topologia da rede constantemente atualizadas. Consequentemente, uma rota para um nó qualquer está sempre disponível, independente da demanda por essa rota. Entretanto, para manter as informações constantemente atualizadas, o envio periódico de mensagens de controle é necessário. Contudo, em redes dinâmicas cujas topologias mudam frequentemente, o uso de mensagens periódicas sobrecarregam a rede. A grande vantagem dos protocolos pró-ativos é que eles não sofrem com o problema do atraso inicial para o estabelecimento de rota.

Os protocolos de roteamento reativos funcionam de forma oposta aos protocolos pró-ativos. Nesses protocolos a descoberta de rota é realizada sob demanda. Logo, quando um dado nó deseja se comunicar com outro nó, um procedimento de busca global é iniciado. O procedimento de descoberta de rota pode utilizar um mecanismo de inundação da rede para disseminar as mensagens de requisição de rota por toda a rede. Quando um nó intermediário que conhece um caminho até o destino ou o próprio destino recebe uma mensagem de requisição de rota, prontamente ele responde enviando uma mensagem de *reply* ao nó que iniciou o processo de descoberta de rota. Por funcionarem sob demanda, os protocolos reativos não sofrem tanto com a sobrecarga da rede como os protocolos pró-ativos. No entanto, eles sofrem

com o problema do atraso inicial para estabelecimento da rota. Os protocolos de roteamento híbridos combinam as duas abordagens citadas anteriormente: pró-ativa e reativa.

À primeira vista, a abordagem pró-ativa aparenta ser uma estratégia mais simples e mais estável. No entanto, ao aplicarmos tal estratégia em ambientes altamente dinâmicos como as redes veiculares, percebemos que para manter as informações sobre a topologia da rede atualizadas é necessário a utilização de muitas mensagens de controle. Consequentemente, problemas com a sobrecarga da rede e colisões de pacotes são inevitáveis. Por essa razão, a estratégia pró-ativa é ideal para ambientes relativamente estáticos.

Já os protocolos reativos são os preferidos quando se deve realizar o roteamento em uma rede dinâmica, onde os nós têm poucas rotas ativas. Entretanto, como tradicionalmente os protocolos reativos não levam em consideração parâmetros de mobilidade durante a descoberta de rotas, ao aplicar esses protocolos em cenários altamente dinâmicos como as redes veiculares espera-se a ocorrência frequente de caminhos quebrados, o que geraria excessivas mensagens de difusão que, consequentemente, sobrecarregariam a rede [Taleb et al. 2007].

Para contornar o problema ocasionado pela natureza dinâmica das redes veiculares, parâmetros de mobilidade passaram a ser utilizados por protocolos de roteamento. Entretanto, a dinamicidade não é o único fator que torna o roteamento um desafio no contexto veicular. Conforme mencionado na Seção 1.1, a diversidade de cenários existentes nas redes veiculares contribui também para tornar ainda mais desafiador o roteamento, pois cada um desses cenários possui características peculiares que, por sua vez, influenciam no padrão de mobilidade dos nós.

Devido à variedade de cenários, diversos protocolos de roteamento foram projetados com objetivo de solucionar um ou mais problemas específicos de cada cenário, como em [Lochert et al. 2003], [Tian et al. 2003], [Seet et al. 2004], [Lochert et al. 2005], [Jerbi et al. 2006], [Huang et al. 2007], [Naumov and Gross 2007], [Liu et al. 2008], [Azarmi et al. 2008] e [Zhang and Wolff 2008].

Por exemplo, Zhang *et al.* voltaram suas atenções para o cenário rural, caracterizado por redes esparsas, com pouca densidade e muita mobilidade. Na tentativa de solucionar o problema do roteamento nesse cenário, eles propuseram um protocolo que utiliza a abordagem epidêmica.

Já em [Lochert et al. 2003], [Tian et al. 2003], [Seet et al. 2004], [Lochert et al. 2005], [Jerbi et al. 2006], [Huang et al. 2007] e [Liu et al. 2008], o foco é o cenário urbano. Dentre esses trabalhos, nós podemos destacar os protocolos projetados por

Lochert *et al.* e Tian *et al.* por serem bastante específicos para o cenário urbano, já que eles se baseiam em uma característica típica desse cenário, a existência de cruzamentos, para realizar o roteamento.

Outros trabalhos como [Naumov and Gross 2007] e [Azarmi et al. 2008] propõem protocolos de roteamento de âmbito mais geral, para desempenhar o roteamento no cenário urbano e no cenário de rodovia. Contudo, apesar dos dois protocolos apresentarem melhoria de desempenho comparados com os protocolos de propostos para redes móveis *ad hoc*, o desempenho alcançado não é satisfatório, devido suas limitações, que serão detalhas no Capítulo 2.

Devido ao caráter específico dos protocolos que hoje são encontrados na literatura, assim como a necessidade de novos protocolos de roteamento capazes de desempenhar o roteamento satisfatoriamente nos mais diversos tipos de cenários de redes veiculares (i.e., urbano, rodovia e rural), vários esforços vêm sendo realizados para desenvolver um protocolo para todos esses cenários [Jin et al. 2009].

Contudo, apesar de existirem várias soluções propostas para o problema do roteamento em redes veiculares, ainda não está claro que características específicas os protocolos devem levar em consideração na tomada de decisão, já que nenhuma das soluções propostas alcançou um desempenho satisfatório em mais de um cenário [Boban et al. 2008].

Os cenários urbano e de rodovia representam a maior parte das redes veiculares, já que em escala global a maior parte do tráfego de veículos ocorre em vias urbanas, enquanto as vias rurais são as menos movimentadas, resultando na baixa densidade comumente presente nas vias rurais, o que torna a utilização de uma estratégia de roteamento capaz de possibilitar um bom desempenho dos protocolos no cenário rural e em outro cenário mais difícil. Por essas razões e pela maior semelhança entre os cenários urbanos e de rodovia, neste trabalho nós focamos na análise do desempenhos dos protocolos de roteamento nesses cenários.

1.3 Objetivo e Metodologia

Levando em consideração o que foi discutido na seção anterior, como ponto inicial em direção à compreensão dos principais fatores que devem ser considerados ao se projetar um protocolo de roteamento para redes veiculares, nesta dissertação é proposta a identificação e análise, através de simulações extensivas de soluções existentes, do impacto da densidade veicular, da carga da rede e da mobilidade no desempenho de um protocolo de roteamento.

Para atingir esse objetivo apresentamos o estado da arte das principais características das redes veiculares focando principalmente nossas discussões no impacto dessas características no roteamento. Para validar nossa discussão teórica, implementamos em um simulador de redes dois importantes protocolos de roteamento para redes veiculares bastante citados na literatura e dois protocolos típicos das redes móveis *ad hoc*. Nós focamos nossos resultados principalmente no estudo do impacto que a densidade de veículos, da carga da rede e do padrão de mobilidade têm no roteamento em função das peculiaridades do cenário de rede implementado.

A metodologia científica utilizada nesta dissertação pode ser resumida a seguir:

- Revisão bibliográfica

Inicialmente, foi efetuada uma revisão bibliográfica extensiva sobre os conceitos e desafios das redes veiculares. Em seguida, foi realizada a revisão bibliográfica dos principais protocolos de roteamento para redes veiculares sempre relacionando o funcionamento de cada protocolo às necessidades de comunicação impostas pelos cenários.

- Estudo de ferramentas para geração de modelos de mobilidade e de simuladores de redes

O próximo passo foi realizar um estudo detalhado sobre os modelos de mobilidade aplicados nas redes veiculares, assim como as suas implicações. Uma vez definido o melhor modelo de mobilidade, foi realizado um estudo das ferramentas capazes de implementar os modelos de mobilidade desejados. Em paralelo, foi realizado um estudo para definir um simulador de rede compatível com o formato das ferramentas geradoras dos modelos de mobilidade.

- Implementação dos Protocolos de Roteamento

Uma vez definidos os modelos de mobilidades e o simulador de rede a serem utilizados, foram escolhidos os protocolos a serem implementados e realizada a implementação dos mesmos com o intuito de compará-los nos cenários urbano e de rodovia presentes nas redes veiculares. A definição dos cenários foi realizada focando sempre em aproximar ao máximo os cenários utilizados na simulação com os cenários reais das redes veiculares.

- Simulação e Análise dos Resultados

Por fim, com o intuito de alcançar um ponto de partida para a implementação de um protocolo de roteamento capaz de manter um bom desempenho

nos cenários urbanos e de rodovia, foram efetuadas simulações em ambiente computacional com características similares às encontradas em cenários reais. Em seguida, foi efetuada a análise e comparação do comportamento dos protocolos nos cenários simulados, urbano e de rodovia, levando em consideração a densidade veicular, a carga da rede e a mobilidade dos nós.

1.4 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está organizada conforme os seguintes capítulos:

- Capítulo 1

No Capítulo 1 é apresentada a contextualização e a motivação deste trabalho, bem como o objetivo e a metodologia seguida no seu desenvolvimento.

- Capítulo 2

No Capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica sobre as redes veiculares, focando principalmente em suas principais características e conceitos. Além disso, algumas aplicações típicas de redes veiculares e o padrão WAVE do IEEE são detalhados.

- Capítulo 3

O Capítulo 3 apresenta um histórico sobre o roteamento nas redes veiculares, um esquema geral que caracteriza os protocolos de roteamento para redes veiculares, um resumo dos principais protocolos de roteamento e, por fim, uma análise comparativa dos mesmos.

- Capítulo 4

O Capítulo 4 apresenta uma discussão sobre os modelos de mobilidade utilizados para simulação das redes veiculares. É feita uma análise comparativa entre os principais modelos utilizados na literatura e são descritas as principais críticas de cada modelo, apontando o modelo de mobilidade mais adequado para representar a mobilidade dos veículos. Também são apresentadas as ferramentas necessárias para trabalhar com a simulação de redes veiculares, as quais incluem ferramentas específicas para trabalhar com a mobilidade dos veículos e ferramentas exclusivas para a simulação de rede.

- Capítulo 5

No Capítulo 5 são apresentadas de forma mais detalhada as motivações e justificativas para a realização deste trabalho, bem como os resultados alcançados. Além disso, são apresentados os resultados das simulações realizadas neste trabalho, sendo discutido impacto da densidade veicular, da carga da rede e da mobilidade em cada um dos cenários simulados através da comparação do desempenho dos protocolos implementados.

- Capítulo 6

Por fim, no Capítulo 6, são apresentadas as conclusões sobre esta dissertação e as perspectivas para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Redes veiculares

Os avanços alcançados na computação móvel e na comunicação sem fio levaram ao desenvolvimento do Sistema Inteligente de Transporte, cujo principal foco é melhorar a segurança nas estradas e prover conforto ao usuário [Mohammad S. Almalag 2009]. Nesse contexto, as redes veiculares assumem um papel importante, devido principalmente aos altos custos gerados por acidentes no trânsito e consequentes gastos com saúde. Entretanto, para que as redes veiculares se tornem uma realidade para os usuários é necessário solucionar desafios de pesquisa existentes.

Nesse capítulo são apresentadas as redes veiculares e suas principais características e desafios. Na Seção 2.1 é apresentado um histórico sobre a evolução das tecnologias de comunicação sem fio e o consequente desenvolvimento das redes *ad hoc*. Na Seção 2.2 são descritas as principais características e desafios que diferem as redes veiculares dos demais tipos de rede. Na Seção 2.3 são discutidas e categorizadas as aplicações desenvolvidas para as redes veiculares. Na Seção 2.4 é apresentado o padrão WAVE, que está sendo desenvolvido pelo IEEE para possibilitar a comunicação V2V e V2I em nível global e, consequentemente, possibilitar o desenvolvimento das redes veiculares. Por fim, na Seção 2.5 são apresentadas as principais conclusões sobre o capítulo.

2.1 Histórico

Recentes avanços nas tecnologias de comunicação de curto alcance têm permitido o desenvolvimento dos mais variados tipos de redes sem fio. Em particular, as redes *ad hoc* têm emergido nos últimos anos como uma das áreas de pesquisa de destaque na comunidade de redes de computadores. Uma rede *ad hoc* consiste em um conjunto de nós equipados com interfaces sem fio, as quais permitem que os nós

Propriedade	MANET	RMSF	RSSF	Redes veiculares
Tamanho da rede	Médio	Moderado	Grande	Grande
Mobilidade dos nós	Randômica	Estática	Em grande parte estática	Alta, não randômica
Limitação de energia	Alta	Muito baixa	Muito alta	Muita baixa
Poder computacional	-	Alto	Muito baixo	Alto
Capacidade de armazenamento	-	Alta	Muito baixa	Alta
Dependência da localização	Baixa	Muito baixa	Alta	Muito alta

Tabela 2.1: Características dos diversos tipos de redes *ad hoc* [Francisco J. Ros et al. 2009].

se comuniquem entre si sem a necessidade de qualquer tipo de infraestrutura.

A Tabela 2.1 sumariza as principais diferenças entre as *Mobile Ad hoc Networks* (MANETs), Redes *Mesh* Sem Fio (RMSF), Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) e redes veiculares.

Enquanto a alta mobilidade dos nós é uma característica presente em redes veiculares, em redes mesh e redes de sensores os nós são geralmente estáticos. Em relação aos recursos das redes, podemos destacar as redes de sensores como um caso crítico de falta de recursos. Nessas redes, os nós são geralmente pequenos dispositivos sem-fio com energia limitada, pequeno poder computacional e limitações de armazenamento. Limitações relacionadas à energia também podem ser encontradas em algumas MANETs cujos os nós têm como fonte de energia as baterias. No caso das redes veiculares, apesar dos nós utilizarem baterias como fonte de energia, estas baterias possuem uma carga bem maior e podem ser constantemente recarregadas.

Os nós sensores sem-fio geralmente são utilizados para monitorar áreas específicas, logo a localização é uma informação importante para esse tipo de rede. Nas redes veiculares, a localização pode ser uma informação crucial para o funcionamento de aplicações e até mesmo dos protocolos de roteamento.

2.2 Características Principais

As redes veiculares são consideradas um caso especial das *Mobile Ad hoc Networks* (MANETs) e, por essa razão, herdam algumas características dessas redes. Entre-

tanto, as redes veiculares possuem características inerentes que as diferenciam das outras redes e influenciam diretamente no desenvolvimento dessa tecnologia.

Nas próximas subseções, apresentamos as principais características das redes veiculares, seus cenários e desafios.

2.2.1 Arquitetura

A arquitetura das redes veiculares define como os nós se organizam e se comunicam. Nas redes veiculares podemos encontrar três tipos de arquitetura [Li and Wang 2007] [Mo et al. 2006]:

Wireless Local Area Network (WLAN)/Celular ou infra-estruturada: Nessa arquitetura são usados pontos de acesso WLAN e *gateways* celulares para prover acesso à Internet e realizar o roteamento de mensagens. A comunicação é do tipo veículo-infra-estrutura (V2I). Desta forma, os pontos de acesso WLAN têm prioridade para conexão e onde não há cobertura a rede celular é utilizada. Apesar de ser uma boa solução para o problema de conectividade, esse tipo de arquitetura é inviável devido aos altos custos envolvidos, principalmente na instalação de antenas celulares, e largura de banda limitada. Como ilustrado na Figura 2.1(a), se o carro A quiser se comunicar com o carro D, todas as mensagens enviadas por A deverão passar pela antena, que será encarregada de encaminhá-las para o carro D.

Ad hoc: Nessa arquitetura todos os nós móveis comunicam-se sem qualquer elemento centralizador, ou seja, em modo *ad hoc* puro. A comunicação é do tipo veículo-veículo (V2V). Cada veículo desempenha o papel de roteador e encaminha tráfego através de múltiplos saltos. Como ilustrado na Figura 2.1(b), para o carro A se comunicar com o carro D não é mais necessária a presença de infra-estrutura física, pois o nó A pode entregar a mensagem diretamente ao nó D ou utilizar nós intermediários (veículos) para alcançar o destino. A principal desvantagem dessa configuração está no fato da conectividade da rede depender da densidade e do padrão de mobilidade dos veículos [Rafael Alves et al. 2009]. Apesar disso, devido ao seu baixo custo e sua alta flexibilidade de implantação, essa arquitetura vem sendo a mais utilizada nas pesquisas [Mo et al. 2006].

Híbrida: Como ilustrado na Figura 2.1(c), a arquitetura híbrida combina as duas arquiteturas detalhadas anteriormente, ou seja, ela combina a comunicação V2I e V2V. Assim, se o nó A desejar se comunicar com o nó D em uma arquitetura híbrida,

esta comunicação pode ocorrer tanto através de pontos de acesso WLAN e *gateways* celulares, quanto através de uma comunicação *ad hoc*.

Este trabalho está focado na busca de soluções para a arquitetura do tipo *ad hoc*, já que ela apresenta-se mais factível nos dias atuais, principalmente por envolver um menor custo. Além disso, como veremos no Capítulo 4, as ferramentas disponíveis atualmente para a simulação das redes veiculares não possuem recursos suficientes para simular a comunicação veículo-infraestrutura de forma satisfatória.

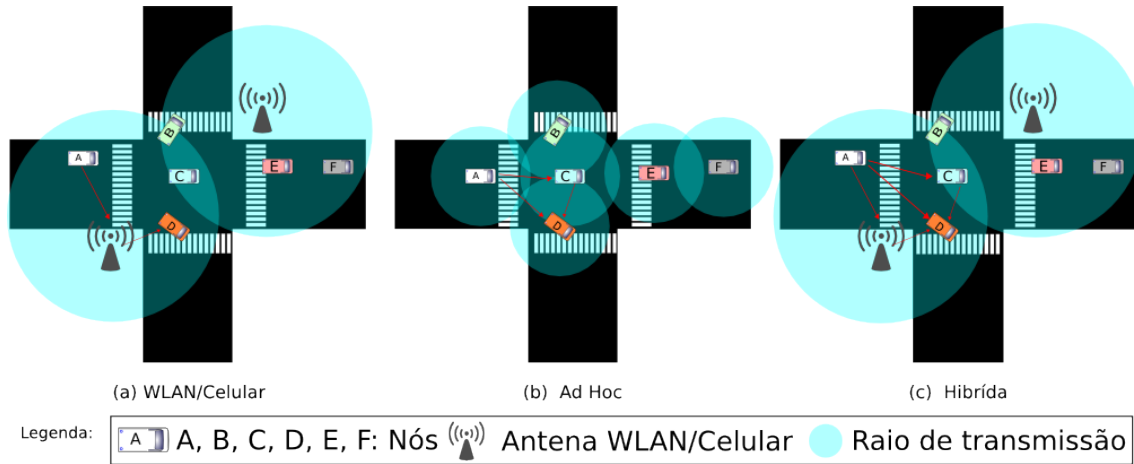


Figura 2.1: Tipos de arquiteturas para Redes Veiculares.

2.2.2 Recursos

No desenvolvimento de protocolos para a nova geração de redes veiculares é importante considerar que os nós desse tipo de rede possuem características diferentes dos nós das redes tradicionais *ad hoc* sem fio. Uma das principais características é a capacidade de reserva de energia, que é consideravelmente maior que a encontrada em nós de redes móveis tradicionais. Esta energia é obtida de baterias a bordo dos veículos, que podem ser recarregadas sempre que necessário. Portanto, o consumo de energia não é um fator crítico em redes veiculares.

Outro diferencial das redes veiculares é o tamanho e o peso dos nós, que possuem uma ordem de magnitude consideravelmente maior que os nós de outras redes sem fio. Esses fatores, combinados ao longo tempo de vida das baterias, permitem um suporte computacional de alto nível, ou seja, que os componentes instalados nos veículos sejam maiores e mais pesados, com uma grande capacidade de processamento e armazenamento.

Desta forma, é cada vez mais comum os veículos saírem equipados de fábrica com computador de bordo e sistema de posicionamento global (*Global Positioning*

System - GPS) com mapas das ruas e avenidas atualizados. As informações obtidas por esses componentes podem ser utilizadas pelas aplicações e pelos protocolos para aumentar o desempenho. Por exemplo, Lochert *et al.* [Lochert et al. 2003] utilizam mapas junto com o algoritmo de Dijkstra [Dijkstra 1959] para calcular a menor rota entre origem e destino. Dessa forma, o melhor caminho entre a origem e o destino é composto por uma sequência de cruzamentos. Entretanto, destaca-se que nessa abordagem não é levado em consideração o fato de que um número mínimo de veículos é essencial para prover a conectividade no caminho escolhido.

Conforme veremos ao longo deste trabalho, a disponibilidade de um sistema de localização global nas redes veiculares possui um forte impacto no desenvolvimento dos protocolos de roteamento e das aplicações.

2.2.3 Mobilidade dos Nós

Nas redes veiculares, os nós não se movem aleatoriamente. A movimentação dos veículos é limitada por uma topologia fixa (e.g., ruas e avenidas) que muitas vezes impõe limites de velocidade, podendo variar repentinamente. Além disso, um veículo pode ter seus movimentos restringidos pelos veículos mais próximos.

Considerando essas características peculiares da mobilidade das redes veiculares, modelos de mobilidade que representam o movimento (localização, velocidade, aceleração) de nós móveis que varia ao longo do tempo [Alam 2009] são particularmente importantes no estudo dessas redes. Afinal, realizar experimentos em ambiente real típico das redes veiculares é uma tarefa bem complexa, que envolve questões de logística e alto custo financeiro, bem como limitações tecnológicas.

Sendo assim, essas características tornam o modelo de mobilidade para redes veiculares único e desafiador e ao realizarmos estudos sobre as redes veiculares não podemos separá-los do estudo dos modelos de mobilidade, já que a dinamicidade da rede influencia diretamente o desempenho dos protocolos de roteamento.

No entanto, ao levar os estudos sobre redes veiculares para o domínio de simulação, introduzimos um elemento intermediário complexo, representado pela necessidade de reproduzir o movimento peculiar dos veículos dentro do ambiente de simulação de rede. Além disso, o grau de complexidade dos movimentos dos veículos encontrados na literatura de redes veiculares vem evoluindo constantemente nos últimos anos [Fiore 2009]. A tendência de utilização de modelos estocásticos simplistas, prática comum nos trabalhos pioneiros, vem dando espaço a modelos cada vez mais complexos, como mostra a Figura 2.2.

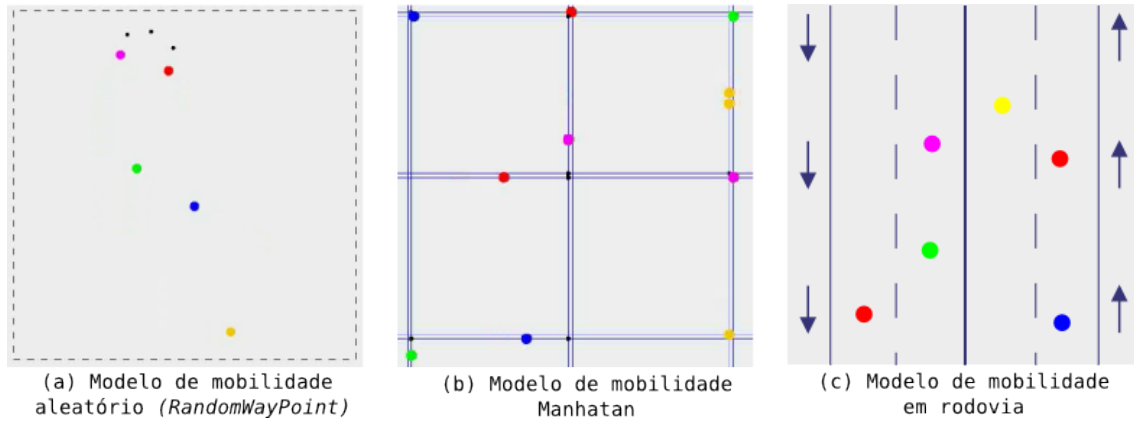


Figura 2.2: Exemplos de modelos de mobilidade.

A Figura 2.2(a) mostra um modelo de mobilidade típico das redes móveis *ad hoc*, onde os nós se movimentam aleatoriamente. A Figura 2.2(b) ilustra o modelo de mobilidade Manhattan [Buruhanudeen et al. 2007], que é um modelo estocástico onde os nós param em cada cruzamento e escolhem que direção seguir. A Figura 2.2(c) apresenta um exemplo de cenário em rodovia, onde existem rápidas interações entre veículos que se movimentam em sentidos contrários.

No Capítulo 4 discutimos mais profundamente detalhes dos modelos de mobilidade nas redes veiculares. Ao final deste mesmo capítulo apontamos o modelo de mobilidade que mais se aproxima do ambiente real esperado e, em seguida, tratamos das ferramentas necessárias para utilizar tal modelo nas simulações, bem como torná-las mais realistas.

2.2.4 Dinamicidade da Rede

As redes veiculares são bastantes dinâmicas devido à alta mobilidade dos automóveis, cuja velocidade é muito superior à velocidade dos nós em outros tipos de rede *ad hoc*. Uma consequência direta da alta velocidade dos nós na rede é a constante mudança na topologia da rede e, conseqüentemente, o aumento da instabilidade dos enlaces sem-fio.

Um grande número de protocolos de roteamento para redes *ad hoc* móveis encontrados na literatura se baseia na topologia da rede para encontrar o melhor caminho entre pares origem-destino da rede. Em geral, o melhor caminho é aquele que oferece o menor custo de acordo com as métricas utilizadas (e.g., menor número de saltos entre origem e destino). Esses protocolos podem ter seu desempenho bastante degradado pela alta mobilidade dos nós devido à alta carga de controle gerada. Por

exemplo, quando executado em um ambiente de redes veiculares *ad hoc*, 70% a 95% do tráfego de rede gerado pelo protocolo *Ad hoc On-Demand Distance Vector* (AODV) é dedicado à difusão de mensagens de descoberta de rotas (*Route REQuest* - RREQ) [Naumov et al. 2006].

Outra característica interessante dos nós móveis das redes veiculares é a de que os nós que trafegam em alta velocidade podem diminuir ou zerar a velocidade em poucos segundos, mudando para um cenário com uma taxa de mobilidade consideravelmente menor. Esse tipo de comportamento torna a topologia da rede praticamente estática. Desta forma, um nó móvel mudaria em questões de segundos de um cenário altamente dinâmico para um cenário praticamente estático. Para melhor exemplificar esta situação basta imaginar um motorista que está em alta velocidade (aproximadamente 100 Km/h) em uma rodovia e que, após percorrer alguns quilômetros, se depara com um congestionamento na entrada de uma zona urbana em horário de pico. Este motorista, dadas as condições locais do trânsito, seria obrigado a reduzir sua velocidade.

2.2.5 Conectividade da Rede

Nas redes veiculares a conectividade da rede está relacionada à três fatores principais: a densidade da rede, a sinalização de trânsito e o raio de transmissão dos veículos.

Em relação à densidade, quanto maior o número de nós em uma via, maior é a garantia de estabelecimento de caminhos fim-a-fim entre pares origem-destino. Logo, uma via com escassez de nós sofre com problemas como frequentes desconexões, interrupções de serviço e, até mesmo, ausência de um caminho fim a fim entre pares origem-destino.

A densidade de veículos em um determinado instante depende diretamente do dia e horário em questão. Uma baixa densidade de veículos é esperada nas madrugadas, mas pode ser extremamente alta em horário de pico (7 às 10 horas e 17 às 20 horas) nos grandes centros urbanos. Similarmente, a densidade de veículos é diferente em feriados, finais de semana, eventos esporádicos (e.g., shows e jogos) e situações inesperadas como acidentes e vias interditadas. Até mesmo as condições meteorológicas podem influenciar na densidade de veículos. Assim, uma avenida em zona urbana pode ser ideal para comunicação entre veículos às 8 horas de uma quarta-feira, mas às 22 horas do domingo a comunicação pode ser prejudicada se o número de veículos for insuficiente para estabelecer rotas e encaminhar mensagens.

Como citado na Seção 2.2.3, as sinalizações (e.g., sinais de trânsito, placas e fiscalizações eletrônicas) e até mesmo os outros veículos na via, podem fragmentar a rede. Por exemplo, se dois carros trafegando no mesmo sentido estão se comunicando e apenas um pára no sinal, provavelmente a conexão entre eles deixará de existir.

O alcance da transmissão dos nós também é um fator importante quando se fala em conectividade em redes veiculares. Quanto maior o alcance de transmissão dos nós, maior será o período de conexão. Em [Lochert et al. 2003] são realizados testes em ambiente real com veículos equipados com dispositivos IEEE 802.11. É mostrado que o uso de antenas externas viabiliza as transmissões entre nós por uma faixa entre 500m e 800m. Por exemplo, se o raio de alcance sem fio é de 280m e existe um enlace entre dois veículos que estão distantes 140m e se movimentando a 20m/s em direções opostas, nessa situação, o enlace vai existir por no máximo 7s. Pode parecer uma situação simples quando analisada de forma isolada. Entretanto, em um cenário real com vários veículos, essa situação é bastante recorrente.

2.2.6 Cenários

Uma característica peculiar das redes veiculares é a diversidade de cenários. Em geral, os cenários de redes veiculares são classificados em urbano, rural e rodovia [Francisco J. Ros et al. 2009].

Cenário Urbano: Em ambientes urbanos, a densidade de veículos pode favorecer a comunicação de múltiplos saltos, graças à menor mobilidade dos nós. Entretanto, isso varia de acordo com o horário. Em algumas horas do dia, o tráfego de veículos pode ser baixo, com poucos carros, porém, nos horários de pico, o número de carros nas vias cresce consideravelmente. Além disso, nesse cenário a presença de obstáculos para os sinais sem fio é mais frequente, por exemplo, árvores e prédios. Acidentes e obras na pista também podem influenciar o comportamento do trânsito de maneira considerável, prejudicando a comunicação. A Figura 2.3 ilustra dois exemplos de cenários urbanos.

Cenário Rural: Em um ambiente rural, a densidade de veículos esperada é baixa, o que resulta em uma rede com conectividade intermitente. Isso significa que a rede é particionada em pequenos grupos de veículos, formando *clusters*, que não conseguem se comunicar diretamente. Para superar esse problema, uma solução seria os veículos encaminharem seus pacotes de dados através de infra-estruturas físicas como ponto



(a) Avenida Aguanambi as oito horas da manhã.

(b) Avenida Aguanambi as dezenove e trinta.

Figura 2.3: Exemplos de cenários urbanos.

de acesso WLAN e *gateways* celulares. Entretanto, como citado na Seção 2.2.1, os altos custos envolvidos na instalação dessas infra-estruturas tornam essa solução inviável. Acrescenta-se a esse problema a carência de infra-estrutura de rede em ambientes rurais, o que agrava drasticamente o problema da conectividade. Uma solução de mais baixo custo para a conectividade intermitente é usar os próprios nós móveis (veículos) para armazenar, transportar e entregar os dados entre os *clusters* [Oliveira and Otto C. M. B. Duarte 2007]. Neste caso, são necessários protocolos eficientes para lidar não somente com a conectividade intermitente, mas, em alguns casos, com os longos atrasos determinados pela soma dos tempos de atraso salto-a-salto. Outra característica do cenário rural é que nele espera-se que a velocidade média dos veículos seja baixa.

Cenário de Rodovia: Em um cenário de rodovia, o padrão de mobilidade é claramente diferente dos outros cenários, pois, neste caso, os veículos podem em geral trafegar em alta velocidade sem cruzamentos e sinais de trânsito. Este cenário é aparentemente mais simples que os demais. Entretanto, o fato de normalmente dois veículos só se cruzarem torna a comunicação nesse cenário desafiadora. A Figura 2.4 ilustra exemplos de cenários de rodovia.

2.3 Aplicações

As redes veiculares têm sido alvo de inúmeras pesquisas científicas nos últimos anos, cujo principal foco é o desenvolvimento do Sistema Inteligente de Transporte. Além disso, dado que os automóveis são cada vez mais importantes na vida das pessoas, embarcar softwares inteligentes em seus carros pode melhorar substancial-



(a) Rodovia Marechal Rondon [Wikimedia 2009a]. (b) Rodovia Washington Luís [Wikimedia 2009b].

Figura 2.4: Exemplos de cenários de rodovia.

mente a qualidade de vida dos usuários. Esse fato, somado à significativa demanda do mercado por mais confiabilidade, segurança e entretenimento nos veículos, levou ao desenvolvimento e suporte significantes para as redes veiculares e suas aplicações [Uichin Lee et al. 2009].

As aplicações para redes veiculares podem ser classificadas em duas grandes categorias: aplicações de segurança e aplicações de conforto [Jakubiak and Koucheryavy 2008].

2.3.1 Aplicações de Segurança

A segurança no trânsito sempre foi a principal motivação para o desenvolvimento das redes veiculares e do Sistema de Transporte Inteligente. Além disso, os altos gastos gerados por acidentes de trânsito e consequentes gastos com saúde, fazem com que as aplicações de segurança recebam uma atenção ainda maior dos grandes consórcios automobilísticos.

As aplicações de segurança em geral têm caráter preventivo e emergencial, no qual o objetivo principal é divulgar rapidamente informações para que o condutor ou um sistema de segurança ativo tenha tempo de reagir e evitar uma situação de perigo. Nesse tipo de aplicação é comum a utilização da comunicação via difusão, a fim de maximizar o número de veículos alertados. Como principais requisitos para as aplicações de segurança nós podemos destacar a baixa latência e a alta confiabilidade. Além disso, as aplicações precisam ser robustas à inserção de mensagens falsas e informações conflitantes.

As tecnologias de segurança atualmente utilizadas nos veículos são baseadas em um único veículo base como, por exemplo, o sensor de estacionamento. No

entanto, veículos com esse tipo de tecnologia não estão aptos a compartilhar dados com veículos próximos, limitando assim sua capacidade. Além disso, quando não existem veículos dentro do raio de visão direto, tais tecnologias não funcionam. Esses problemas levaram ao desenvolvimento de outras tecnologias para aumentar a segurança no trânsito.

Com veículos aptos a comunicarem-se entre si, informações importantes podem ser compartilhadas e utilizadas por alguma aplicação de segurança para aumentar a segurança no trânsito. Estas aplicações podem utilizar a comunicação V2V, V2I ou ambas. Elas podem ser classificadas em cinco diferentes categorias [Mohammad S. Almalag 2009]:

- **Sistema de anticolisão em cruzamentos:** Geralmente, sistemas de anticolisão em cruzamentos são baseados na comunicação V2I e/ou V2V. A infra-estrutura nas proximidades dos cruzamentos possui sensores que coletam informações dos veículos próximos. Os dados coletados pelos sensores são processados e analisados para determinar se existe alguma situação perigosa que possa provocar um acidente. Se o risco existir, uma mensagem de aviso é enviada para os veículos naquela área.
- **Segurança pública:** Aplicações de segurança pública são desenvolvidas para assistir as equipes de emergência na provisão de seus serviços, bem como ajudar motoristas que precisam de cuidados médicos. Minimizar o tempo de viagem das equipes de emergência é o foco da maioria das aplicações de segurança pública. Outro tipo de aplicação dessa categoria foca na requisição de ajuda quando motoristas sofrem acidentes, evitando assim acidentes secundários.
- **Sinalização estendida:** Manter os motoristas em alerta é o principal objetivo das aplicações de sinalização estendida. A grande motivação dessa categoria de aplicação é o fato de que nos últimos anos novas tecnologias, como telefonia celular, vêm sendo utilizadas durante o ato de dirigir, o que pode distrair os motoristas. Basicamente, esse tipo de aplicação alerta os motoristas sobre as sinalizações das vias. Esta categoria de aplicação utiliza comunicação V2I, principalmente através de mensagens enviadas periodicamente.
- **Diagnóstico e manutenção de veículos:** Aplicações de diagnóstico e manutenção de veículos alertam os proprietários dos veículos sobre defeitos que podem comprometer a segurança do veículo e também sobre programas de manutenção de seus veículos. A principal aplicação dessa categoria é o aviso

de *recall* de segurança, onde a infraestrutura envia mensagem para veículos que estão qualificados para o *recall*.

- **Informações de outros veículos:** Este tipo de aplicação utiliza comunicação de curto alcance entre os veículos. De acordo com o objetivo de cada aplicação, diferentes informações são obtidas através da comunicação entre veículos. Por sua vez, essas informações podem ser utilizadas de diversas maneiras por cada aplicação com o intuito de prover sua funcionalidade da melhor forma. São exemplos de aplicações dessa categoria: alerta de mudança de faixa, alerta sobre a condição da via e alerta cooperativa de colisão.

Dentro da categoria de aplicações de segurança, destacamos o sistema *Emergency Eletronic Brake Light* (EEBL) como o primeiro a utilizar unicamente a comunicação entre veículos [Mohammad S. Almalag 2009]. Esse sistema corresponde a um *Original Equipment Manufacturer* (OEM) financiado pela BMW, Daimler Chrysler, Ford, GM, Nissan e Toyota. O projeto EEBL começou em junho de 2005 e foi finalizado em março de 2006. A principal idéia do EEBL é alertar o motorista quando um veículo a sua frente realizar uma frenagem brusca.

Nos veículos atuais, as luzes traseiras são utilizadas para alertar os veículos trafegando atrás do seu veículo. Entretanto, em algumas situações tal mecanismo não é eficiente. Por exemplo, em más condições climáticas, onde a visibilidade é prejudicada (e.g., chuva forte, neblina, neve), os motoristas dos veículos atrás de um dado veículo podem ter dificuldade para ver o alerta antes de estarem próximos demais. Logo, devido a necessidade de haver outra maneira de alertar os motoristas capaz de suprir as deficiências dos métodos atuais, o sistema EEBL foi desenvolvido.

A Figura 2.5 ilustra um cenário de utilização do sistema EEBL, onde por alguma razão o veículo A está freando de forma brusca. Logo, o EEBL irá enviar uma mensagem de alerta para todos os veículos no raio de alcance do veículo A. Esta mensagem de alerta inclui informações como o ID do veículo, posição, velocidade, desaceleração e direção. Todas essas informações serão utilizadas pelos veículos que receberem a mensagem de alerta para decidir se devem simplesmente ignorá-la ou reagir de alguma forma.

Por exemplo, se os veículos que receberem a mensagem de alerta estiverem atrás do veículo A, eles serão notificados sobre a frenagem, mesmo que eles não estejam vendo o veículo A. Por exemplo, o motorista do veículo C não pode ver o veículo A porque o veículo B está bloqueando sua visão. Outros veículos, como D e E, também irão receber a mensagem de alerta enviada por A e seus respectivos motoristas serão

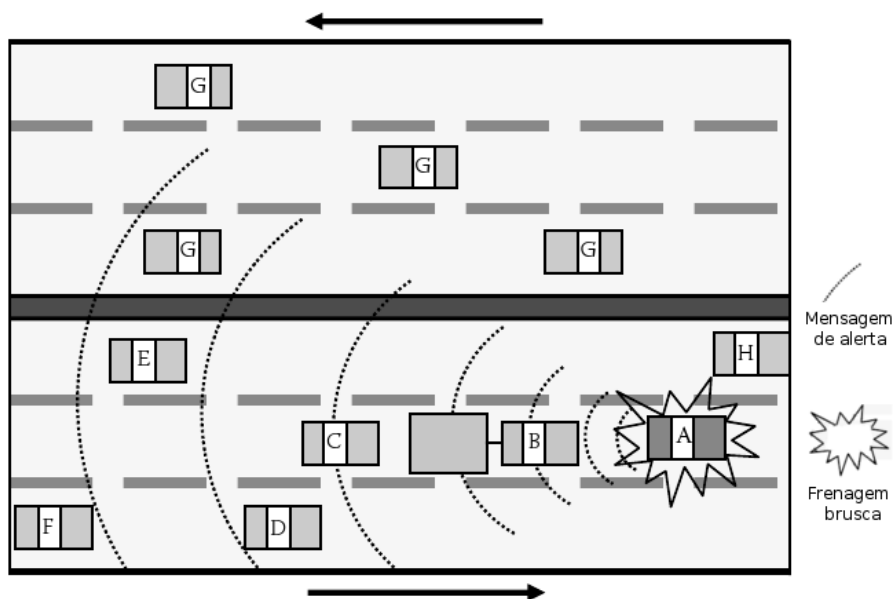


Figura 2.5: Cenário em que o sistema EEBL é utilizado. [Mohammad S. Almalag 2009].

notificados. Já o veículo F, por estar muito distante de A, não será alertado sobre a frenagem de A. Se os veículos que estão se movendo em outra direção receberem a mensagem de alerta, estas serão simplesmente ignoradas.

Idéias simples como o sistema EEBL podem evitar acidentes e consequentes custos. Espera-se que com o desenvolvimento crescente das redes veiculares as aplicações de segurança sejam responsáveis pelo aumento da segurança no trânsito. Entretanto, para alcançar esse objetivo, alguns pontos ainda devem ser discutidos, tal como a padronização, que já começou a ser discutida com o padrão WAVE, além das limitações tecnológicas como, por exemplo, os protocolos de roteamento atuais.

2.3.2 Aplicações de Conforto

Atualmente, as pessoas passam grande parte do tempo dirigindo, logo, ao embarcarmos aplicações em seus veículos podemos melhorar potencialmente a qualidade de vida desses usuários. Esse é justamente o foco das aplicações de conforto.

As aplicações dessa categoria têm como objetivo prover conforto e conveniência aos usuários. Por essa razão, dentro desta categoria nós podemos encontrar diversos tipos de aplicações, que vão desde *office-on-wheels* à entretenimento. Algumas dessas aplicações são simples adaptações de aplicações comuns na Internet, como aplicações de compartilhamento de arquivos entre usuários, correio eletrônico, *download* de músicas e filmes [Cavalcanti 2008], dentre outras. Outras aplicações mais sofisticadas

envolvem a descoberta local de serviços baseado na vizinhança do veículo. Além disso, algumas aplicações podem ser baseadas exclusivamente na interação entre veículos, como alguns jogos.

Muitas aplicações para redes veiculares defendem o uso da arquitetura *ad hoc* por dispensar elementos de infraestrutura para possibilitar a comunicação entre veículos. Além disso, como citado anteriormente na Seção 2.2.1, no caso infraestruturado, manter a rede totalmente conectada requer um alto custo de instalação e manutenção. Por essa razão, muitas aplicações de entretenimento preferem utilizar sistemas par-a-par (*Peer-to-Peer* - P2P) ao modelo cliente-servidor, que é centralizado [Rafael Alves et al. 2009]. Esse fato, somado à capacidade de armazenamento e processamento dos nós das redes veiculares, torna as aplicações P2P viáveis no contexto das redes veiculares. As aplicações P2P envolvem diversos tipos de aplicação, não apenas a troca de arquivos. Em [Uichin Lee et al. 2009], os autores classificam as aplicações P2P de acordo com o papel do veículo na gestão de dados:

- **Fonte de dados:** Nessa categoria de aplicações, os veículos são exclusivamente fonte de dados. Graças aos recursos existentes nos veículos, eles são uma plataforma ideal para coleta e produção de dados, especialmente no contexto de monitoramento urbano, através do uso de diversos sensores. Destaca-se nessa categoria o uso de sensores nos veículos, como câmera de vídeo, detectores químicos ou até sensores acústicos. Dessa forma, um veículo pode, por exemplo, captar imagens das ruas e depois processá-las, ou encaminhá-las em forma de mensagem para outros veículos alertando sobre um possível acidente ou congestionamento. Devido à abundância de recursos observada nos nós das redes veiculares, estes podem gerar dados a uma taxa que seria impossível de ser utilizada nas redes de sensores tradicionais. Um dos requisitos para esse tipo de aplicação é o armazenamento persistente e confiável dos dados para uma recuperação posterior. Além disso, são necessários protocolos de rede para a retirada eficiente de dados de interesse, por exemplo, encontrando todos os veículos em dado período de tempo e em certa localização.
- **Consumidor de dados:** Nessa categoria, os veículos são apenas consumidores de dados ou conteúdo. Os veículos podem ser potencialmente consumidores de conteúdo, dado que eles possuem recursos locais que possibilitam transferência de grande quantidade de dados. O tipo de conteúdo consumido pelos veículos engloba vários tipos de dados, que vão desde arquivos de multimídia à dados sobre as condições da via. Durante uma viagem, motorista e passa-

geiro podem utilizar aplicações dessa categoria para diversas finalidades, tais como entretenimento e auxílio à navegação. Destacam-se nessa categoria as aplicações relacionadas à multimídia, como *streaming* de filmes, músicas e aplicações sensíveis à localização, que utilizam informações de localização para, por exemplo, auxiliar na navegação ou para entregar anúncios que possam interessar aos usuários dos veículos.

- **Consumidor e produtor de dados:** Nessa classe de aplicações, os veículos são consumidores e produtores de conteúdo. Destacam-se nessa categoria aplicações interativas, principalmente jogos, *online* ou não. Dado o crescente interesse por jogos no ambiente das redes veiculares, os autores [Tonguz and Boban 2010] realizaram simulações para determinar as características de qualidade de serviço mais importantes para os jogos no contexto das redes veiculares. Após identificar os principais desafios para possibilitar a utilização de jogos nas redes veiculares, os autores propuseram um novo paradigma para esses jogos, o qual é adaptado às limitações desse ambiente e que faz uso de suas características dinâmicas. Aplicações de vídeo conferência também pertencem a essa categoria. As aplicações dessa categoria requerem retiradas e disseminação de dados sensíveis à localização. Em particular, aplicações interativas requerem comunicação em tempo real entre os veículos.
- **Intermediário:** Em todas as categorias de aplicações descritas anteriormente é necessário confiar em veículos intermediários. Em um grupo de veículos, um dado veículo pode cooperar para aumentar a qualidade do desempenho da aplicação no grupo todo. Mais especificamente, veículos podem fornecer armazenamento temporário para outros, assim como encaminhar dados ou consultas.

Em resumo, as aplicações de conforto abrangem uma gama ampla de aplicações. Mesmo aplicações da mesma categoria podem ter requisitos diferentes. Devido a essa diversidade, a análise de requisitos deve ser realizada caso a caso.

2.4 Padrão WAVE

Em 2004, o IEEE iniciou a padronização das comunicações em redes veiculares através do grupo de trabalho IEEE 802.11. O padrão, que ainda está em fase

de desenvolvimento, atualmente é conhecido como 802.11p *Wireless Access in the Vehicular Environment* (WAVE).

O principal objetivo do 802.11p WAVE é prover um conjunto padronizado de interfaces para que diferentes fabricantes de automóveis possam prover comunicação entre veículos ou entre veículos e infra-estrutura. A padronização é fundamental para o desenvolvimento em escala global das redes veiculares, já que é essencial que haja a interoperabilidade entre todos os dispositivos fabricados para a expansão do uso das redes veiculares.

Apesar do padrão WAVE ainda estar em fase de desenvolvimento, o primeiro passo em direção a padronização já foi realizado através da definição da arquitetura WAVE.

A arquitetura WAVE é definida em seis documentos: IEEE P1609.1, IEEE P1609.2, IEEE P1609.3, IEEE P1609.4, IEEE 802.11 e IEEE 802.11p. O padrão 802.11p, que é baseado no padrão de redes locais 802.11a, define as camadas físicas e de controle de acesso ao meio (MAC) para redes veiculares. Os padrões da família IEEE 1609 definem outras camadas da pilha de protocolos da arquitetura WAVE, bem como características de segurança. A Figura 2.6 ilustra toda a pilha da arquitetura WAVE.

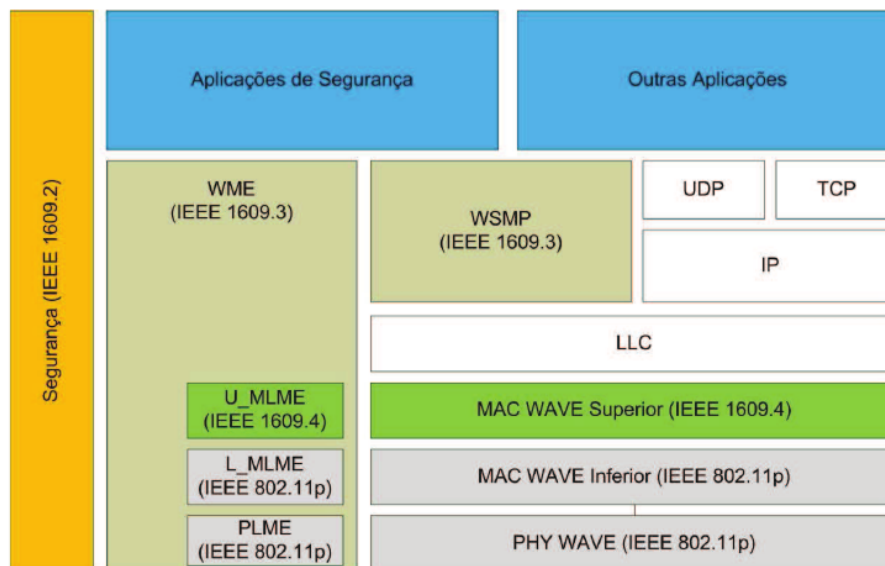


Figura 2.6: Pilha de protocolos 802.11p WAVE [Rafael Alves et al. 2009].

O padrão de IEEE P1609.1 [IEEE1609.1 2006] especifica serviços e interfaces da aplicação de Gerenciamento de Recursos da arquitetura WAVE. O principal objetivo desse padrão é permitir a completa interoperabilidade de aplicações utilizando a arquitetura WAVE, de forma a simplificar a unidade de bordo, reduzindo o custo

e aumentando o desempenho. Por se tratar de uma aplicação WAVE, o Gerente de Recursos definido pelo padrão IEEE 1609.1 não é representado na arquitetura WAVE.

A natureza de segurança crítica de muitas aplicações para redes veiculares torna vital a necessidade do uso dos serviços especificados na arquitetura WAVE para proteger as mensagens de ataques maliciosos. Como a arquitetura WAVE será utilizada em veículos pessoais, cujos proprietários têm direito à privacidade, é necessário que os serviços de segurança sejam concebidos de modo a respeitar esses direitos. Para alcançar esse objetivo, o padrão IEEE 1609.2 [IEEE1609.2 2006] define a pilha de segurança da arquitetura WAVE e o formato e processamento das mensagens seguras.

O IEEE P1609.3 [IEEE1609.3 2007] especifica os serviços das camadas de rede e transporte, incluindo o endereçamento e o roteamento e é representada na arquitetura pela *Wireless Management Entity* (WME) e pelo *Wireless Short Message Protocol* (WSMP). Também fazem parte do escopo do padrão IEEE P1609.3 os protocolos *User Datagram Protocol* (UDP), *Transmission Control Protocol* (TCP) e o *Internet Protocol* (IP), bem como a camada de controle lógico (*Link Layer Control* - LLC).

O padrão IEEE 1609.4 [IEEE1609.4 2006] define as modificações no padrão IEEE 802.11 para operar em múltiplos canais, as camadas físicas (PHYs), e a camada de acesso ao meio (MAC). O padrão 1609.4 define também a utilização do canal de controle (*Control CHannel*) (CCH) e dos canais de serviços (*Service CHannel* - SCH).

2.5 Conclusão

Segurança no trânsito sempre foi a maior motivação para o desenvolvimento das redes veiculares, entretanto, somente devido ao seu potencial comercial em aplicações de conforto, elas vêm recebendo grandes investimentos nos últimos anos. Grande parte desses investimentos é realizada pelas grandes montadoras, e, graças a esses investimentos, hoje existem diversos projetos desenvolvendo aplicações com foco na segurança dos usuários e também no conforto deles.

Como são um caso especial das MANETs, as redes veiculares herdam algumas características dessas redes, entretanto, as características inerentes das redes veiculares como a mobilidade dos nós, a abundância de recursos computacionais e a velocidade de movimentação dos nós, tornam o ambiente veicular desafiador e único.

2.5. CONCLUSÃO

Visando possibilitar a comunicação nesse ambiente, o IEEE iniciou a padronização da comunicação em redes veiculares, com o 802.11p WAVE.

Capítulo 3

Roteamento em Redes Veiculares

O roteamento em redes veiculares é uma tarefa desafiadora devido à alta mobilidade dos nós e à instabilidade dos enlaces sem-fio. Por essa razão, o roteamento em redes veiculares tem sido alvo de vários trabalhos de pesquisa. Entretanto, nenhuma solução geral foi encontrada, ou seja, nenhum protocolo proposto obteve desempenho considerável nos diversos cenários existentes nas redes veiculares. Ainda assim, resultados importantes foram alcançados.

Neste capítulo tratamos dos principais aspectos relacionados ao roteamento nas redes veiculares. Na Seção 3.1 é apresentado um histórico com foco no roteamento sobre a evolução das comunicações sem fio e o conseqüente desenvolvimento das redes *ad hoc*. Na Seção 3.2 é apresentada uma visão geral do roteamento em redes veiculares. Na Seção 3.3, apresentamos o estado da arte dos principais protocolos de roteamento existentes e uma comparação dos mesmos. Por fim, na Seção 3.4 apresenta algumas conclusões e considerações sobre este capítulo.

3.1 Histórico

Uma das características mais importantes das redes *ad hoc* é o conceito da comunicação sem fio de múltiplos saltos. Utilizando esse tipo de comunicação, os nós móveis podem enviar mensagens para destinos que não estejam na área de transmissão do nó de origem. Quando o destino está a vários saltos de distância, os nós intermediários realizam o encaminhamento das mensagens até o destino. Dessa forma, é necessário um protocolo de roteamento capaz de encontrar um caminho entre os nós de origem e destino para que as mensagens sejam entregues. De uma maneira geral, os nós *ad hoc* podem ser móveis, o que torna desafiador o desenvolvimento de protocolos de roteamento.

Durante os últimos anos, o conceito de comunicação *ad hoc* de múltiplos saltos evoluiu devido às características inerentes dos tipos de redes, tais como a mobilidade dos nós, a capacidade computacional, a limitação de recursos dos nós, dentre outras. Apesar de manter os mesmos princípios básicos de comunicação, cada tipo de rede tem peculiaridades suficientes para evitar a existência de uma solução única para todos os casos [Francisco J. Ros et al. 2009].

Assim como para as redes móveis *ad hoc*, a comunicação de múltiplos saltos é uma das premissas mais importantes para o desenvolvimento das redes veiculares, já que a possibilidade de distribuição eficiente de dados entre os vizinhos é essencial para várias aplicações de redes veiculares, como aplicações de segurança. Devido à semelhança entre essas redes, os protocolos de roteamento típicos das redes móveis *ad hoc* foram naturalmente os primeiros protocolos utilizados para realizar o roteamento nas redes veiculares. Entretanto, estudos realizados demonstraram o baixo desempenho desses protocolos no contexto das redes veiculares. Naumov *et al.* [Naumov et al. 2006] mostram que grande parte do tráfego gerado é dedicado ao envio de mensagens de controle.

Portanto, apesar dos protocolos para as MANETs funcionarem quando aplicados nas redes veiculares, é esperado que seus desempenhos não sejam satisfatórios, principalmente quando comparados aos protocolos capazes de explorar todas as informações acessíveis no ambiente veicular. As principais limitações técnicas dos protocolos de roteamento para redes móveis *ad hoc* quando aplicados no cenário veicular são [Francisco J. Ros et al. 2009]:

- **Escalabilidade:** A maioria dos protocolos de roteamento desenvolvidos para MANETs foi projetada para suportar um limitado número de nós móveis (entre cem e duzentos nós). A maneira como esses protocolos estabelecem os caminhos é custosa quando aplicada em redes densas como as redes veiculares. Especificamente, os protocolos pró-ativos armazenam as rotas para todos os nós da rede na sua tabela de roteamento. Tal comportamento é impraticável em redes veiculares, já que seria necessário armazenar rotas para todos os veículos.
- **Conectividade total:** A conectividade da rede não é uma característica das redes veiculares. Apesar do destino não ser alcançável no momento do envio de um pacote, um veículo pode carregar o pacote até que o destino seja eventualmente alcançado. Este paradigma é chamado de Redes Tolerantes ao Atraso e Desconexões (*Delay and Disruption Tolerant Networks - DTNs*)

[[Oliveira et al. 2008](#)].

- **Predição de mobilidade:** A maioria dos protocolos de roteamento para MANETs não faz suposição em relação a um padrão de mobilidade particular dos nós móveis. Apesar dessa característica garantir uma maior flexibilidade em relação ao cenário onde dado protocolo pode ser aplicado, ao mesmo tempo ela apresenta-se ineficiente em casos onde a mobilidade dos nós pode ser prevista. Esse é o caso das redes veiculares, onde os nós são limitados pela organização das vias, limite de velocidade, sinalização de trânsito e pelas iterações com outros veículos. Dessa forma, as estratégias típicas das MANETs ignoram possíveis vantagens que podem ser obtidas ao lidar com padrões de mobilidade controlados.
- **Antecipação a quebra de caminhos:** Os protocolos de roteamento para MANETs lidam com a quebra de caminhos causada pela mobilidade dos nós através de mensagens de controle periódicas ou criando caminhos periodicamente. Esses protocolos são ajustados de maneira que possam reagir após a quebra de um enlace. No entanto, em vários cenários das redes veiculares é possível prever e/ou evitar quebras de enlaces utilizando informações de mobilidade dos vizinhos.
- **Uso extensivo de mensagens de difusão:** A maioria dos protocolos de roteamento para MANETs é baseada em difusão de mensagens [[Perkins and Royer 1999](#)] [[Johnson et al. 2001](#)] [[Chakeres and Perkins 2010](#)]. Nos protocolos de roteamento reativos o nó de origem utiliza a difusão para encontrar uma rota para o destino. Nos protocolos pró-ativos, cada nó envia periodicamente mensagens de controle para sua vizinhança. Esse tipo de operação consome muita largura de banda com mensagens de controle e limita significativamente o desempenho desses protocolos quando aplicados em redes maiores, como as redes veiculares. Devido ao grande número de veículos comumente presente no ambiente veicular, a utilização de um mecanismo de difusão que necessite da participação da maioria dos nós da rede deve ser evitado.
- **Operações não locais:** Os protocolos de roteamento para MANETs são algoritmos distribuídos usados para calcular rotas. No entanto, a criação e manutenção de rotas requerem a participação de todos os nós da rede. Nos protocolos pró-ativos cada nó participa construindo sua tabela de roteamento. No caso dos protocolos reativos, os nós participam na difusão de requisições

para encontrar o caminho até o destino. Nas redes veiculares, devido ao potencial número de veículos, soluções de roteamento locais nas quais os nós tomam decisões baseadas apenas na sua vizinhança são mais aplicáveis em termos de escalabilidade, controle de sobrecarga e adaptação às diferentes condições de rede. No entanto, para alcançar esse objetivo, o destino da comunicação deve ser conhecido ou um serviço de localização deve ser desenvolvido.

- **Exploração das informações existentes:** Veículos podem ser equipados com computadores que podem prover informações relevantes sobre trajetória, velocidade e direção do movimento, além de informações sobre mapas. Essas informações podem ser úteis para melhorar o desempenho do roteamento. Comumente, protocolos de roteamento para MANETs ignoram aspectos relacionados à mobilidade dos nós.

Para possibilitar o roteamento eficiente no ambiente veicular é necessário direcionar esforços para diminuir o impacto das limitações técnicas identificadas nas soluções propostas para as MANETs ou, até mesmo, solucionar os problemas encontrados nas mesmas. O primeiro passo para isso é o próprio conhecimento das características inerentes das redes veiculares que podem influenciar no roteamento, que é a principal contribuição dessa dissertação.

3.2 Características Principais

Para contornar os problemas herdados das estratégias propostas para redes móveis *ad hoc* e maximizar o desempenho de protocolos de roteamento em redes veiculares, deve-se considerar os fatores anteriormente ignorados. A Figura 3.1 apresenta uma visão geral do funcionamento de um protocolo de roteamento para redes veiculares adaptado de [Guoqing et al. 2008].

As funções básicas de um protocolo de roteamento são: descoberta de rotas, encaminhamento de mensagens e manutenção de rotas. A complexidade dessas funções varia de acordo com o tipo da rede onde será realizado o roteamento. No caso específico das redes veiculares, alguns fatores tornam-se importantes para o desenvolvimento de um protocolo de roteamento eficiente, como mostra a Figura 3.1.

Um primeiro fator importante são as entradas de um protocolo para redes veiculares, que são divididas em dois grupos: características da rede e dispositivos auxiliares. O uso das características da rede como entrada é essencial. Dentre essas características podemos destacar o tipo do cenário (urbano, rural ou rodovia). Como

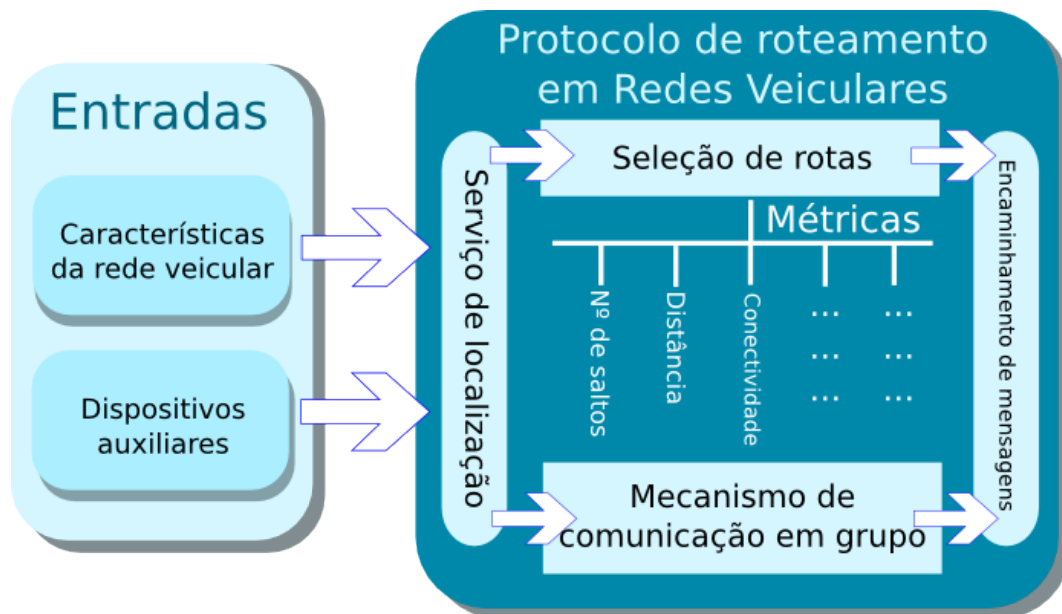


Figura 3.1: Visão geral do funcionamento de um protocolo de roteamento para redes veiculares. Figura adaptada de [Guoqing et al. 2008].

o cenário tem influência na mobilidade dos nós, o protocolo poder obter vantagem dessa informação, adaptando sua estratégia de acordo com o cenário. Alguns protocolos propostos para rede veiculares fazem o uso de algumas dessas informações para auxiliar no roteamento, como veremos no decorrer da Seção 3.3.

De uma forma geral, pode-se considerar as entradas do esquema da Figura 3.1 como informações de contexto, as quais podem ser utilizadas para realizar inferências e, desta forma, adaptar o funcionamento do protocolo de roteamento. Protocolos que utilizam essa estratégia são chamados de sensíveis ao contexto que por sua vez, são capazes de monitorar, perceber e descrever mudanças no ambiente [Márcio Maia et al. 2008]. Utilizar de forma sábia tais informações é um dos pontos necessários para melhorar o desempenho do roteamento no ambiente veicular.

Após as entradas do protocolo tem-se o serviço de localização. O objetivo desse serviço é descobrir de maneira direta a localização do destino. Dentre os serviços de localização existentes destaca-se o serviço de localização reativo (*Reactive Location Service* - RLS) [Camp et al. 2002]. Basicamente, o RLS funciona da seguinte forma: quando o nó origem deseja saber a posição geográfica de um determinado nó, ele envia um pacote de consulta de localização (*location query packet*). Esse pacote contém o id do nó de origem e sua respectiva posição, além do id do nó de destino. Com essas informações o pacote é difundido pela rede durante seu tempo de vida ou até encontrar o destino. Ao chegar ao destino, o nó destinatário responde a consulta

utilizando o pacote de resposta de localização (*location reply*), que contém a sua posição e o id do nó requisitante. Esse pacote é difundido da mesma maneira que o pacote de consulta até encontrar o nó de origem. Apesar de ser bastante utilizado, o RLS é um mecanismo que nem sempre está disponível. Em protocolos que não utilizam serviço de localização, estratégias semelhantes à utilizada pelo *Ad hoc On Demand Distance Vector* (AODV) são usadas para descobrir a rota para o destino.

Uma vez que a posição do nó de destino é conhecida, torna-se necessário estabelecer um caminho pelo qual as mensagens serão encaminhadas. Durante o estabelecimento de rota, informações de entrada podem ser utilizadas para, por exemplo, limitar o número de veículos que vão encaminhar as mensagens de requisição. Desta forma, reduz-se a difusão de mensagens de controle e, conseqüentemente, a sobrecarga da rede, tornando o protocolo mais escalável.

Para decidir qual o melhor caminho para encaminhar uma mensagem até o destino, um protocolo pode utilizar algumas métricas simples como: número de saltos, distância física entre origem e destino, dentre outras. Novamente nessa fase é possível fazer o uso das informações de entrada para torna a decisão mais precisa. Informações sobre o movimento do nó e/ou de mapas podem ser utilizadas para prever a posição de um nó específico, já que em redes veiculares o movimento dos nós é limitado pelas vias. Essas informações também podem ser utilizadas para definir métricas mais robustas capazes de tornar mais precisa a decisão do melhor caminho no ambiente veicular. Além disso, outro fator favorável ao uso de informações de entrada durante esta fase é a possibilidade de tomar decisões locais baseadas apenas na vizinhança do nó.

Outra estratégia que pode ser utilizada para realizar a seleção de rotas é o uso de um mecanismo de agrupamento baseado na posição geográfica, como por exemplo o *geocast* [Bernsen and Manivannan 2008]. No *geocast* o destino são nós posicionados em uma região geográfica específica, que pode ser relativa à origem. Este tipo de estratégia torna-se necessária quando se deseja comunicar com nós de uma região específica como, por exemplo, uma região próxima de acidente onde os veículos devem ser alertados para mudar sua rota.

Finalizada a etapa de seleção de rotas, a mensagem é encaminhada até o destino. Durante o encaminhamento dos pacotes é esperado que aconteçam quebras de enlaces causadas principalmente pela dinamicidade dos veículos. Logo, mecanismos de manutenção de rotas são necessários para garantir o melhor desempenho do protocolo de roteamento. Conforme citado anteriormente, é possível utilizar informações de contexto para realizar a manutenção das rotas antes mesmo da quebra do enlace.

Apesar da manutenção de rotas ser um mecanismo importante, como veremos a seguir, nem todos os protocolos propostos para as redes veiculares o implementa.

Uma vez conhecido o comportamento básico dos protocolos de roteamento para redes veiculares, a próxima seção apresenta alguns protocolos de roteamento propostos para redes veiculares.

3.3 Protocolos de Roteamento

Vários protocolos para redes veiculares já foram propostos na literatura. O ponto comum entre os principais protocolos é a utilização de parâmetros de mobilidade nas métricas de seleção de melhores rotas. Dessa forma, quando um protocolo utiliza informações como velocidade, posição do nó ou mesmo a direção do movimento de um nó, o protocolo pode ser chamado de baseado em posição ou geográfico. Quando um protocolo utiliza um veículo fixo ou utiliza sua posição geográfica na escolha do melhor caminho, classificamos esse protocolo com baseado em âncoras. Protocolos que utilizam a estratégia de armazenar o pacote até que um caminho até o destino esteja disponível são classificados com armazena e encaminha. Protocolos preditivos são aqueles que fazem alguma previsão sobre o comportamento dos nós, seja relativo à posição, velocidade ou direção do movimento. Por fim, protocolos adaptativos são aqueles que modificam seu comportamento de acordo com mudanças no contexto.

A seguir são apresentados alguns protocolos de roteamento para redes veiculares seguindo a ordem cronológica de publicação.

3.3.1 GSR

O *Geographic Source Routing* (GSR) [Lochert et al. 2003] é um protocolo de roteamento baseado em posição para ambientes com alta mobilidade dos veículos em uma topologia previamente conhecida. A principal idéia desse trabalho é a utilização de informações sobre a topologia da rede através do uso de mapas. Além disso, os autores assumem que todos os veículos têm o conhecimento de sua posição. Esta suposição é válida, já que vários veículos vêm equipados com sistemas de navegação, como dispositivos GPS.

O conhecimento da posição do destino é um requisito para que o roteamento seja realizado corretamente. Para descobrir a posição do destino o protocolo utiliza um serviço de localização reativo, detalhado anteriormente no Capítulo 2. Com o conhecimento da topologia e da posição do destino, o protocolo faz o uso do algoritmo de

Dijkstra [Dijkstra 1959] para calcular o menor caminho entre a origem e o destino. A lista de cruzamentos do menor caminho é então incluída no cabeçalho das mensagens que serão transmitidas seguindo uma abordagem gulosa. Nessa abordagem, as mensagens são transmitidas para o vizinho mais próximo do cruzamento, até que a mensagem alcance o destino.

O protocolo tenta selecionar nós localizados em cruzamentos para evitar que obstáculos físicos atrapalhem a transmissão das mensagens. Entretanto, os autores não levam em consideração a quantidade de veículos nos cruzamentos. Logo, é possível que em alguns cruzamentos a conectividade existente não seja suficiente para realizar a transmissão. Como o protocolo utiliza um serviço de localização reativo para encontrar a posição do destino, a sua escalabilidade não é garantida, já que o serviço de localização é baseado em difusões globais.

O artigo apresenta também alguns resultados comparativos do GSR com o AODV e com o *Dynamic Source Routing* (DSR) [Johnson et al. 2001] em um cenário urbano. O desempenho do GSR é melhor que o DSR principalmente devido à sobrecarga causada pelo DSR. Em relação ao AODV, o GSR obteve um desempenho similar em relação à taxa de entrega dos pacotes. No entanto, em relação ao atraso na entrega dos pacotes, o DSR obteve um desempenho superior.

3.3.2 SAR

O *Spatial Aware Routing* (SAR) [Tian et al. 2003] é um protocolo de roteamento que utiliza informações da topologia para encaminhar as mensagens. Assim como o GSR, o SAR utiliza uma estratégia gulosa para realizar o encaminhamento das mensagens. Nesse tipo de estratégia, o algoritmo faz a escolha ótima para as condições locais na esperança de que essa escolha leve a uma solução ótima para a situação global. Contudo, por não levar em consideração condições futuras no momento de realizar as escolhas, essa estratégia nem sempre produz uma solução ótima, podendo assim ficar presa a ótimos locais [Cormen 2001]. Por essa razão, o protocolo SAR também está sujeito à ocorrência de ótimos locais.

O principal objetivo desse protocolo é realizar o roteamento de forma que mesmo ao alcançar um ótimo local a mensagem não seja descartada, como acontece no GSR. Para isso, é proposta uma estratégia para encontrar um caminho alternativo nessas situações.

Para alcançar esse objetivo, é proposto um modelo espacial do ambiente baseado em informações da topologia, que é obtido através de sistemas de navegação. Essas

informações são representadas através de um grafo $G(E, V)$, onde V são os vértices que representam lugares e E são as arestas que representam as ruas que ligam os lugares. Dessa forma, os veículos se movimentam de um lugar para outro, ou seja, de um vértice para outro através das arestas.

Os autores assumem que a posição destino é obtida através de um serviço de localização e que cada nó conhece sua localização. Então o nó de origem calcula o menor caminho (a lista de lugares/vértices) para o destino através do algoritmo de Dijkstra. Ao invés de encaminhar os pacotes para o vizinho mais próximo do destino, o SAR encaminha o pacote para o vizinho com o menor caminho até o próximo vértice indicado pelo caminho calculado pela origem, e assim sucessivamente até alcançar o destino.

Uma das vantagens dessa estratégia é que o protocolo evita que mensagens sejam encaminhadas para nós que não possam entregá-las ao destino devido às restrições da topologia. Entretanto, como o encaminhamento de mensagem é baseado em localizações estáticas e não leva em consideração a conectividade das vias, logo não é garantido a existência de enlaces suficientes para realizar a entrega das mensagens.

Quando um ótimo local é alcançado, o nó pode calcular outro caminho para o destino utilizando o algoritmo de Dijkstra, eliminando a aresta atual. Outra estratégia proposta para evitar o descarte de pacotes consiste no armazenamento da mensagem enquanto um novo vizinho é escolhido.

O artigo apresenta uma comparação de desempenho do SAR com o *Greedy Perimeter Stateless Routing* (GPSR) [Karp and Kung 2000], um protocolo de baixo desempenho em redes veiculares [Naumov et al. 2006]. O cenário urbano utilizado nas simulações foi baseado em uma região da cidade de Stuttgart. O SAR obteve uma taxa de entrega melhor que o GPSR. Em relação à sobrecarga, em redes pouco densas, o GPSR apresentou uma menor sobrecarga, mas em redes densas o SAR apresentou um melhor desempenho, já que a sobrecarga gerada por ele é praticamente independente da densidade da rede.

3.3.3 A-STAR

O *Anchor-based Street and Traffic Aware Routing* (A-STAR) [Seet et al. 2004] é mais um protocolo de roteamento que utiliza informações obtidas de mapas para realizar o roteamento. Assim como o GSR e o SAR, essas informações são utilizadas para calcular o melhor caminho para realizar o encaminhamento da mensagem. No entanto, diferentemente do GSR e do SAR, no A-STAR o melhor caminho não é

o caminho mais curto. Nesse caso, são utilizadas informações sobre o tráfego para decidir qual o melhor caminho.

Analisando o tráfego em regiões metropolitanas, os autores chegaram a conclusão que algumas ruas e avenidas onde há presença de serviço de transporte público, têm maior capacidade de prover conectividade para a comunicação V2V sobretudo devido à presença mais estável de ônibus e veículos de passeio.

De posse das informações sobre as linhas de transporte público, são atribuídos pesos a cada rua de acordo com o número de linhas de ônibus que circulam nela. Ruas não servidas por transporte público têm o peso máximo. Os autores assumem que essas informações são previamente carregadas no mapa. O algoritmo de Dijkstra é aplicado para calcular o caminho de peso mínimo. Desta forma, os pacotes são encaminhados de maneira gulosa através dos nós presentes no caminho escolhido como melhor.

De forma similar ao SAR, um novo caminho é calculado quando a mensagem atinge um ótimo local. Além disso, para evitar que outros pacotes sejam encaminhados pelo mesmo caminho, a rua com ótimo local é marcada como fora de serviço temporariamente e essa informação é distribuída para a rede através de mensagens de retorno. Dessa forma, os nós que receberem essa mensagem podem atualizar seus mapas com a informação sobre as ruas fora de serviço.

Os resultados apresentados no artigo demonstram o melhor desempenho do A-STAR comparado com o GSR e o GPSR no cenário urbano. No entanto, a maior deficiência do A-STAR está no fato dele transferir quase todo o tráfego de mensagens para veículos localizados nas vias principais, o que pode causar congestionamento da banda. Além disso, apesar dos veículos localizados nas ruas secundárias serem capazes de prover caminhos com boa conectividade, a chance deles serem escolhidos nessa estratégia é mínima.

3.3.4 GPCR

O *Greedy Perimeter Coordinator Routing* (GPCR) [Lochert et al. 2005] difere-se dos outros protocolos apresentados até o momento, principalmente por não utilizar nenhuma informação externa como mapas das ruas. O protocolo aproveita o fato de que as ruas e cruzamentos formam naturalmente um grafo planar. No entanto, assim como os protocolos apresentados anteriormente, os pacotes de dados devem ser encaminhados para nós localizados nos cruzamentos.

Neste trabalho, os autores introduzem um novo tipo de nó chamado de nó co-

ordenador. Um nó pode ser coordenador se estiver localizado em um cruzamento, o que implica que ele deve enviar mensagens periódicas com informação sobre sua localização. Assim, todo nó da rede é capaz de saber quais dos seus vizinhos são do tipo coordenador.

Para permitir que os nós determinem se eles são coordenadores ou não, os autores propõem duas abordagens. A primeira consiste em tomar a decisão de acordo com as informações incluídas em mensagens periodicamente enviadas. Dessa forma, um nó é qualificado como coordenador quando ele possui dois vizinhos, os quais não são vizinhos entre si. Entretanto, essa abordagem não é precisa, principalmente quando os nós estão localizados em curvas. A segunda abordagem consiste em aplicar um método estatístico para determinar a posição relativa de um nó em relação aos seus vizinhos.

Uma peculiaridade dos nós coordenadores é que eles encaminham as mensagens de maneira diferente dos nós comuns. Nós comuns encaminham mensagens ao longo da rua em direção ao próximo cruzamento. Para isso, a mensagem deve ser encaminhada para o vizinho cuja posição é próxima da linha formada pela posição do nó predecessor e do nó que está encaminhando a mensagem. Caso existam nós coordenadores, um deles é escolhido aleatoriamente. Caso contrário, o nó mais distante é escolhido. Os nós coordenadores, por outro lado, tomam decisões baseadas nas ruas que começam nos cruzamentos onde estão localizados. Utilizando uma abordagem gulosa, o cruzamento mais próximo do destino é escolhido para o encaminhamento da mensagem. Caso um ótimo local seja alcançado, o pacote deve ser continuamente encaminhado até que um nó coordenador seja encontrado. Nesse caso, o nó coordenador utiliza a regra da mão direita para selecionar o próximo nó para o qual a mensagem vai ser encaminhada.

Ao utilizar a regra da mão direita, o GPCR fica sujeito a saltos redundantes. Além disso, como durante a fase de recuperação apenas os nós coordenadores podem ser escolhidos, pode ser necessário encaminhar as mensagens para um nó distante do ótimo local. Apesar disso, os autores demonstraram que comparado com o GPSR, que utiliza mapas, o GPCR alcança taxas de entrega consideravelmente melhores no cenário urbano utilizado.

3.3.5 MURU

O *Multi-Hop Routing Protocol for Urban VANETs* (MURU) foi desenvolvido mesclando a estratégia baseada em posição (*position-based*) e fatores de QoS para

encontrar rotas robustas e alcançar altas taxas de entregas de mensagens, baixa taxa de sobrecarga e baixo atraso [Mo et al. 2006]. Para alcançar tais objetivos, foi introduzida uma nova métrica denominada grau de desconexão esperado (*Expected Disconnection Degree* - EDD), que representa a probabilidade de um enlace quebrar dado um certo período de tempo. O EDD é calculado utilizando as informações de velocidade e da trajetória de cada veículo aliada a uma função de predição de movimento. Para isso, assume-se o conhecimento prévio da topologia da rede. Os autores assumem que os veículos obtêm tais informações através de mapas digitais.

Os autores demonstram através de uma análise matemática que a taxa de erro do pacote (*packet error ratio* - PER) de um enlace é uma função côncava em relação ao número de saltos do caminho, ou seja, um caminho muito grande ou muito pequeno apresenta altas taxas de erro. O melhor caminho é aquele com tamanho intermediário. Essa análise foi realizada considerando que os movimentos dos veículos seguem um padrão semelhante a uma cadeia de Markov.

O MURU requer que cada veículo conheça sua posição e que tenha um mapa das ruas, avenidas, etc. A presença de um serviço de localização eficiente também é assumida, já que através dele é que os nós de origem obtêm a posição dos nós de destino. De posse da posição do destino, o protocolo calcula o menor caminho físico até o destino, baseado nas informações obtidas dos mapas. A partir desse momento, o protocolo inicia a transmissão por difusão de mensagens de requisição de rotas *Route REQuest* (RREQ). No entanto, a transmissão de RREQs é limitada por uma área retangular denominada pelos autores como *broadcast area*. Essa área é definida pela posição dos nós de origem e destino e por uma constante L , que representa o comprimento do quarteirão. A Equação 3.1 demonstra como a área de difusão é calculada.

$$\begin{aligned}
 BroadcastArea.X_{min} &= \min(origem.X, destino.X) - L \\
 BroadcastArea.X_{max} &= \max(origem.X, destino.X) + L \\
 BroadcastArea.Y_{min} &= \min(origem.Y, destino.Y) - L \\
 BroadcastArea.Y_{max} &= \max(origem.Y, destino.Y) + L
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

Quando um nó recebe uma mensagem RREQ, ele determina o EDD entre ele e o nó que lhe enviou a mensagem. Em seguida, o nó atualiza o campo EDD no pacote. Então, ele espera um tempo proporcional ao EDD, chamado de *backoff time*, e, enquanto isso, escuta as mensagens RREQ de outros vizinhos. Se o nó

não descartar a RREQ durante esse tempo, ele irá retransmitir dentro de uma área retangular menor do que a do nó anterior. Segundo o protocolo, um nó descarta uma mensagem RREQ se ele receber uma nova RREQ com valor menor no campo EDD. Depois que o destino receber algumas mensagens RREQ de diferentes rotas, ele escolhe a rota com o menor EDD acumulado e envia uma resposta para a origem contendo o caminho escolhido.

Os autores provam que o MURU é livre de ciclos e que ele sempre escolhe os caminhos com menor EDD. Nas simulações realizadas, o MURU obteve um melhor desempenho que o AODV, DSR e GPSR em relação a taxa de entrega dos pacotes, atraso fim a fim e sobrecarga da rede. Entretanto, o modelo de mobilidade utilizado na simulação não corresponde a um modelo realístico, ele é baseado em cadeias de Markov. Além disso, ao limitar a área de difusão das requisições de rota, o protocolo pode estar descartando um nó que possa prover um bom caminho. Apesar dos autores utilizarem uma função para realizar a predição de movimentos dos veículos e calcular o grau esperado de desconexão, em nenhum momento eles deixam claro como essa função funciona, nem ao menos citam a taxa de erro da predição.

3.3.6 CAR

O protocolo *Connectivity-Aware Routing* (CAR) realiza de forma integrada a localização do destino e a descoberta de caminhos conectados entre origem e destino sem utilizar um serviço de localização [Naumov and Gross 2007]. Ao invés disso, o CAR realiza uma fase preliminar de difusões para localizar o destino. Essa fase de difusão é uma adaptação do algoritmo *Preferred Broadcast Group* (PBG) [Naumov et al. 2006]. Durante a fase de difusão cada nó que encaminha uma requisição de descoberta de caminho PBG preenche os campos número médio de vizinhos, número mínimo de vizinhos e número de saltos. Além disso, nós que estimam estar localizados próximos de cruzamentos adicionam informações sobre sua localização nas mensagens. Essas informações serão utilizadas pelo destino para estimar a conectividade do caminho e conseqüentemente o melhor caminho.

Escolhido o melhor caminho, o destino envia uma mensagem de resposta *unicast* para o caminho inverso da requisição, incluindo a lista de nós localizados próximos aos cruzamentos, nesse contexto chamados de âncoras. Para estimar se estão localizados próximos aos cruzamentos, os nós utilizam um campo especial incluído em mensagens periódicas trocadas entre eles. Cada mensagem contém informações sobre o vetor velocidade do nó. Quando um nó recebe mensagens de dois vizinhos

diferentes com vetores velocidade não paralelos, ele infere que está localizado próximo a um cruzamento. O período em que as sondas são enviadas é adaptado para evitar a sobrecarga da rede. Nós com mais vizinhos esperam mais tempo para enviar sondas, enquanto nós com poucos vizinhos enviam sonda mais frequentemente.

Para encaminhar as mensagens até o destino, o protocolo utiliza uma versão estendida do algoritmo *Advanced Greedy Forward* (AGF) [Naumov et al. 2006]. Ao invés de encaminhar mensagens para os vizinhos mais próximos do destino, as mensagens são encaminhadas para o vizinho mais perto do próximo nó âncora.

Apesar de não necessitar de um serviço de localização e de mapas para realizar o roteamento, o encaminhamento guloso ainda pode levar a ótimos locais. Além disso, os autores não deixam claro como as informações sobre a localização dos nós posicionados próximos a cruzamentos são utilizadas para estimar a conectividade de um caminho. Contudo, o CAR desempenhou-se melhor que o GPSR nos cenários urbano e de rodovia utilizados pelos autores.

3.3.7 ROMSGP

O algoritmo *Receive On Most Stable Group-Path* (ROMSGP) é uma integração do *Receive on most stable path* (ROMSP) [Sakhaee et al. 2007] com agrupamento dos nós baseado no vetor velocidade dos veículos com pequenas modificações para ser aplicado em rede veicular [Taleb et al. 2007]. A idéia principal do ROMSGP é agrupar os veículos utilizando informações de velocidade e direção do movimento. Esse tipo de agrupamento garante que veículos que estejam no mesmo grupo, de maneira geral, estejam se movendo juntos. Logo, rotas que envolvam veículos de um mesmo grupo são consideradas mais estáveis. Dado um conjunto de rotas possíveis, o protocolo escolhe a mais estável e essa decisão é feita baseada na métrica *Link Expiration Time* (LET) [Sakhaee et al. 2007]. O caminho com maior LET é o escolhido.

No esquema proposto, os veículos são agrupados em quatro grupos diferentes baseados no vetor velocidade. No espaço cartesiano, cada grupo é caracterizado por um vetor unitário, [$S_1 = (1, 0)$, $S_2 = (0, 1)$, $S_3 = (-1, 0)$ e $S_4 = (0, -1)$]. Para por em prática o agrupamento de veículos é assumido que cada um deles tem um GPS e que sua posição é verificada a cada segundo. A Figura 3.2 ilustra como os quatro grupos estão representados no espaço cartesiano através dos vetores unitários.

As informações sobre o grupo são incluídas nas mensagens de controle, mais especificamente nas mensagens de requisição de rotas. Dessa forma, quando um veículo

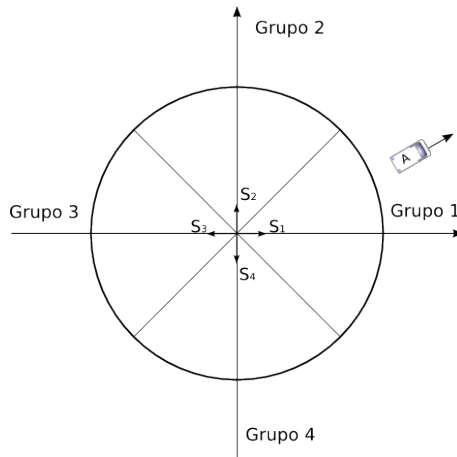


Figura 3.2: Agrupamento dos veículos no ROMSGP.

recebe uma mensagem de requisição de outro veículo, ele compara o identificador do seu grupo com o identificador do veículo que originou a mensagem. Se eles estiverem em grupos diferentes, o enlace entre eles é penalizado, sendo marcado como instável.

É importante ressaltar que, além de penalizar um enlace, quando um veículo recebe uma requisição de um veículo de outro grupo, o veículo receptor simplesmente descarta a mensagem de requisição. Dessa forma, o mecanismo evita a retransmissão de pacotes que podem tornar os enlaces instáveis. Além disso, este mecanismo é capaz de diminuir a sobrecarga da rede por meio de mensagens de controle, requisições de rotas e mensagens de erros resultantes de enlaces instáveis.

As características de agrupamento utilizadas no ROMSGP resultam em poucos caminhos quebrados. Devido a estratégia de agrupamento, a taxa de sobrecarga da rede verificada nas simulações são baixas quando comparadas às obtidas no DSR e no *Associativity-Based Routing* (ABR) [Toh 1997]. Entretanto, os autores não avaliaram outras métricas importantes, como taxa de entrega e atraso fim a fim. Além disso, os autores não deixam claro qual ambiente de simulação é utilizado e, conseqüentemente, o modelo de mobilidade utilizado, que exercem influência nos resultados. Outro ponto que deve ser levado em consideração é a aplicação do agrupamento em cenários com muitas curvas, onde a direção dos veículos se altera constantemente.

3.3.8 AVR

O *Adaptive Routing Protocols for Vehicular Ad hoc Networks* (AVR) [Azarmi et al. 2008] é um protocolo adaptativo que utiliza informações providas por um agente móvel chamado Mob-broker. Esse agente é capaz de retirar informações

dinamicamente a partir de informações locais de cada nó.

A métrica adaptativa utilizada pelo AVR é o LET. Porém, o LET é inferido a partir da densidade da via. A idéia principal do algoritmo é se adequar às constantes mudanças de densidade. Quando a densidade de veículos é alta, a velocidade dos veículos é menor e, portanto, o LET é maior. Nesse caso, o AVR aumenta o tamanho dos pacotes para aproveitar as boas condições de comunicação e diminuir a sobrecarga com mensagens de controle. Além disso, o AVR diminui o raio de transmissão para evitar colisões entre os pacotes transmitidos. Quando a densidade de veículos é pequena, o protocolo diminui o tamanho dos pacotes para diminuir o número de pacotes descartados. Além disso, o protocolo aumenta o raio de transmissão.

O AVR apresentou melhor desempenho nas simulações comparando com o AODV e o *Location-Aided Routing* (LAR) [Ko and Vaidya 2000]. Contudo, os autores não especificam como a métrica LET, que é utilizada na escolha dos caminhos, é calculada.

3.3.9 VADD

O *Vehicle-Assisted Data Delivery* (VADD) utiliza a mobilidade previsível das redes veiculares, restrita às vias e condições de tráfego, aliada à técnica armazena e encaminha [Zhao and Cao 2008]. Os autores assumem que mapas digitais pré-carregados, informações sobre a densidade do tráfego e velocidade das vias em diferentes períodos do dia estão disponíveis. Eles assumem também que cada veículo conhece sua posição através do uso de algum sistema de posicionamento como, por exemplo, GPS.

O VADD possui três modos de operação que dependem da posição do nó que "carrega" a mensagem: cruzamento, linha reta e destino.

O modo de cruzamento é utilizado quando um nó está localizado em um cruzamento e necessita tomar uma decisão acerca do encaminhamento.

A primeira decisão nesse modo é o sentido para o qual a mensagem deve ser encaminhada, que é baseada na distância em relação ao destino, no atraso esperado de entrega e na probabilidade de entrega. Se nenhum nó puder encaminhar a mensagem no sentido prioritário, o segundo sentido na ordem de prioridade é escolhido. Tal procedimento é repetido até que um sentido seja possível. Entretanto, caso não seja possível encaminhar o pacote em nenhum dos sentidos, o nó armazena o pacote em seu *buffer* até que surja alguma oportunidade de encaminhamento.

A segunda decisão a ser tomada no modo de cruzamento é de qual veículo deve

encaminhar a mensagem para dado sentido. Devido algumas possibilidades de escolha dos veículos, os autores propuseram variações do protocolo. O *Location first probe-VADD* (L-VADD) escolhe o veículo que está mais próximo do destino com intuito de utilizar ao máximo o canal sem fio. O *Direction first probe-VADD* (D-VADD) escolhe o veículo que está se movendo no sentido prioritário, mesmo que o destino não seja um vizinho do veículo escolhido. Na situação ilustrada na Figura 3.3(a), supondo que o veículo A deseje enviar uma mensagem para D, o veículo escolhido para realizar o encaminhamento no L-VADD seria o veículo B (mais próximo do destino), enquanto no D-VADD o veículo escolhido seria o veículo C (no mesmo sentido do destino). A Figura 3.3(b) ilustra uma situação onde o L-VADD formaria um ciclo: o nó A deseja encaminhar o pacote para o norte, mas como não há candidatos o sentido leste é verificado. Como não existem candidatos o sentido sul é escolhido e o nó C recebe a mensagem. Imediatamente C verifica os vizinhos na direção norte e descobre que A está mais próximo do destino, formando assim um ciclo.

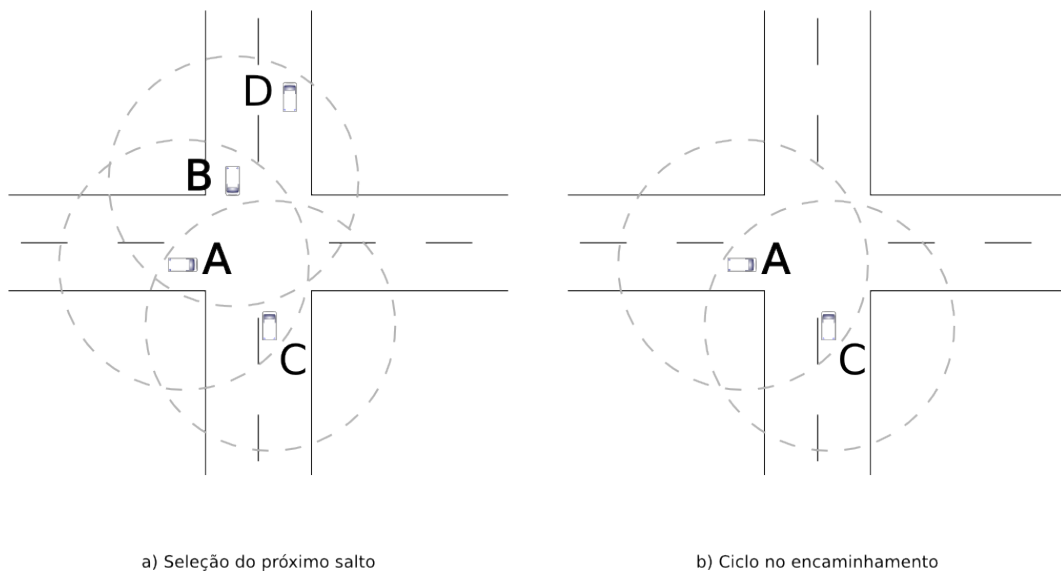


Figura 3.3: Modo de interseção do VADD.

No caso do D-VADD, este é livre de ciclos. Entretanto, ele pode resultar em atrasos de transmissão por formar caminhos mais longos. Por essa razão, os autores propuseram o *Hybrid probe VADD* (H-VADD). Esse protocolo comporta-se inicialmente como o L-VADD e, caso algum ciclo seja detectado, passa a comportar-se como o D-VADD. No modo linha reta, a decisão a ser tomada é mais simples: encaminhar através do cruzamento atrás do veículo ou na frente. Para isso, é calculado o atraso esperado de cada um dos caminhos. O caminho com menor atraso esperado

é escolhido.

Zhao *et. al.* comparam o desempenho dos protocolos VADD, GPSR e DSR com o desempenho de uma abordagem epidêmica, onde os nós enviam mensagens continuamente para seus vizinhos cujo não ainda não receberam a mensagem [Vahdat and Becker 2000]. Nos resultados apresentados pelos autores, o VADD apresentou o melhor desempenho. Dentre as variações do VADD, a versão que apresentou o melhor resultado foi a H-VADD. Entretanto, essas abordagens são aplicáveis apenas para aplicações cujo foco é entrega de dados. Aplicações que necessitem de um retorno de informações não são o foco desse trabalho.

3.3.10 Comparação entre os Protocolos

As Tabelas 3.1 e 3.2 apresentam um comparativo dos protocolos discutidos nesse capítulo. Na Tabela 3.1 os protocolos são classificados de acordo com as características da abordagem. Na Tabela 3.2 os protocolos são classificados de acordo com os requisitos.

Protocolos	Características da abordagem				
	Geográfico	Baseado em âncoras	Armazena e encaminha	Preditivo	Adaptativo
GSR	✓	✓			
SAR	✓	✓	✓		
A-STAR	✓	✓			
GPCR	✓	✓			
MURU	✓			✓	
CAR	✓	✓			
ROMSGP	✓			✓	
AVR					✓
VADD	✓		✓		

Tabela 3.1: Classificação dos protocolos quanto as características da abordagem.

A maior parte dos protocolos apresentados neste capítulo é do tipo geográfico. Os protocolos GSR, SAR e A-STAR utilizam informações sobre a posição do destino e da origem junto com o algoritmo de Djisktra para calcular o melhor caminho entre os nós e, posteriormente, decidir qual caminho deve ser utilizado para a transmissão das mensagens. O protocolo GPCR utiliza as informações sobre localização para decidir se um nó está localizado em um cruzamento ou não, sendo um nó classificado como coordenador de acordo com essa localização. Além disso, durante a fase de recuperação, o GPCR escolhe o nó que será utilizado na transmissão da mensagem

de acordo com sua distância para o destino. Por essas razões, o GPCR é classificado como geográfico. O protocolo MURU utiliza informação sobre a localização do nó para calcular a área de difusão das mensagens de requisição de rota na fase inicial do roteamento e para calcular o EDD é necessário calcular a distância entre os nós que vão se comunicar, para isso, o conhecimento da posição de cada um dos nós é necessário. Logo, classificamos o MURU como protocolo geográfico. O protocolo CAR é classificado como geográfico por utilizar informações sobre localização para estimar se o nó está localizado em um cruzamento e para encaminhar mensagens através dos nós mais próximos dos nós âncoras. No ROMSGP informações sobre velocidade, direção e posição são utilizadas para agrupar os veículos e para calcular o LET, sendo assim classificado como geográfico. O protocolo VADD utiliza informações sobre localização no modo de operação em cruzamentos para tomar decisões sobre qual nó deverá ser utilizado para encaminhar as mensagens. Por essa razão, ele também é classificado como geográfico.

Os protocolos GSR, SAR, A-STAR, GPCR e CAR utilizam o conceito de âncoras para realizar o roteamento. Nos protocolos GSR e A-STAR, as âncoras têm posições específicas. Suas localizações correspondem aos cruzamentos, os quais compõem o caminho utilizado para enviar as mensagens. Nos protocolos SAR e CAR, as âncoras também são localizadas em cruzamentos, entretanto, nesses protocolos elas são usadas apenas como um ponto referência, já que os caminhos são compostos pelos nós mais próximos das âncoras. Diferentemente dos outros protocolos, no protocolo GPCR as âncoras são os próprios veículos localizados nos cruzamentos, chamados nessa abordagem de veículos coordenadores, que compõem os caminhos utilizados para rotear as mensagens.

Quando um caminho até o destino não está disponível alguns protocolos armazenam a mensagem por um tempo pré-definido ou até que um caminho para o destino esteja disponível. Os protocolos SAR e VADD utilizam essa abordagem para diminuir o número de pacotes descartados e para tentar garantir uma melhor taxa de entrega.

Dentre os protocolos apresentados apenas os protocolos MURU e ROMSGP fazem previsões para auxiliar nas tomadas de decisões sobre o roteamento e, por essa razão, eles são classificados como preditivos. Contudo, esses protocolos utilizam a predição de forma diferente. Enquanto no MURU a predição é utilizada no próprio cálculo da métrica de escolha dos melhores caminhos, no ROMSGP a própria métrica, LET, é uma predição, visto que o valor do LET é uma estimativa do tempo de vida do caminho. O protocolo AVR adapta seu funcionamento de acordo com a

variação da métrica LET quem por sua vez, reflete a densidade da rede. Por essa razão, o AVR é classificado como adaptativo.

Protocolos	Requisitos			
	Mapas	Sistema de posicionamento	Serviço de localização	Informações de tráfego
GSR	✓	✓	✓	
SAR	✓	✓	✓	
A-STAR	✓	✓	✓	✓
GPCR		✓	✓	
MURU	✓	✓	✓	
CAR				
ROMSGP		✓		
AVR				✓
VADD	✓	✓		✓

Tabela 3.2: Classificação dos protocolos quanto aos requisitos.

Quanto aos requisitos necessários para o funcionamento do protocolo, destacamos quatro principais. O primeiro são os Mapas, ou seja, se um protocolo necessita de qualquer tipo de informação oriunda de mapas. Os protocolos GSR, SAR e A-STAR utilizam os mapas para ter conhecimento da localização dos cruzamentos que são necessários para construir os caminhos utilizados para realizar o roteamento. O protocolo MURU utiliza os mapas para estimar a probabilidade de um enlace quebrar, o que neste caso depende da probabilidade do veículo mudar de direção. Já o protocolo VADD utiliza mapas capazes de fornecer estatísticas de tráfego.

Os protocolos GSR, SAR e A-STAR necessitam de um sistema de posicionamento global, pois o veículo fonte deve conhecer sua posição e a posição do destino para calcular o melhor caminho entre eles. No protocolo GPCR as informações providas pelo sistema de posicionamento global são utilizadas para determinar se um nó está ou não posicionado em um cruzamento. O protocolo MURU utiliza as informações sobre a localização dos nós, fornecida pelo sistema de posicionamento global, para limitar a área de difusão das mensagens de requisição de rotas e para calcular a métrica EDD. No protocolo ROMSGP as informações fornecidas pelo sistema de posicionamento global são utilizadas no agrupamento dos veículos e no cálculo do LET.

Serviços de localização são comumente usados para descobrir a posição do destino. Dentre os protocolos apresentados, cinco deles utilizam esse tipo de serviço, a seguir: GSR, SAR, A-STAR, GPCR e MURU.

Alguns protocolos utilizam informações de tráfego para realizar o roteamento. O protocolo A-STAR utiliza informações sobre as linhas de transporte público e sobre as principais vias para classificar os possíveis caminhos que serão utilizados para o encaminhamento das mensagens. O protocolo AVR faz uso de informações sobre a densidade das vias para adaptar seu funcionamento e assim melhorar seu desempenho. No protocolo VADD, informações sobre a velocidade dos veículos nas vias e a densidade de veículos nas vias são utilizadas na escolha dos caminhos utilizados para o encaminhamento das mensagens.

3.4 Conclusão

Apesar dos vários protocolos propostos na literatura, ainda não existe nenhuma solução geral para o roteamento em redes veiculares, i.e., um protocolo que apresente resultados satisfatórios nos diversos cenários das redes veiculares. Entretanto, algumas características comuns aos protocolos recentemente propostos caracterizam uma tendência a ser utilizada no desenvolvimento de possíveis soluções. Esta tendência é marcada pela utilização de informações de mobilidade com o intuito de garantir a qualidade dos caminhos escolhidos, bem como o uso de um sistema de posicionamento, cada vez mais comum nas abordagens, o que não representa desvantagem alguma, já que vários veículos atuais já saem de fábrica com tais dispositivos. No entanto, ainda não está claro quais características específicas os protocolos devem levar em consideração na tomada de decisão, já que nenhum protocolo proposto alcançou desempenho satisfatório nos diversos cenários das redes veiculares [Boban et al. 2008].

Capítulo 4

Modelo de Mobilidade

Para avaliar o desempenho de protocolos de roteamento geralmente recorre-se a simulações. Tratando-se de redes veiculares essa prática é ainda mais comum devido principalmente aos custos necessários para realizar simulações em um ambiente real. No entanto, para que essas simulações produzam resultados válidos, é necessário que o ambiente simulado seja o mais próximo possível do ambiente real e, no contexto das redes veiculares, a mobilidade dos veículos é um aspecto fundamental para alcançar essa proximidade. Por essa razão, não podemos tratar de simulações em redes veiculares sem enfatizar a importância da escolha do modelo de mobilidade.

Neste capítulo tratamos dos principais aspectos relacionados a influência do modelo de mobilidade nas simulações de redes veiculares, bem como ferramentas que possibilitam a utilização de modelos de mobilidade adequados para simulação dessas redes. Na Seção 4.1 é apresentado um esquema geral de como são realizadas as simulações de redes veiculares. Na Seção 4.2 apresenta-se as classificações e as análises críticas dos modelos de mobilidade existentes. Por fim, na Seção 4.3 é apresentada a ferramenta utilizada neste trabalho para prover um modelo de mobilidade satisfatório de acordo com o grau de realismo adequado para simulações.

4.1 Simulação de Tráfego

As redes veiculares possuem um padrão de mobilidade único. Nenhuma outra família de redes móveis existente apresenta centenas ou milhares de nós, movendo-se a uma velocidade acima de 10 quilômetros por hora e alternando alta velocidade com intervalos cujos nós estão completamente parados e cuja liberdade de movimentação é limitada por complexas interações (veículo-veículo), por uma topologia precisa (limites da vias) e por uma complexa legislação de trânsito [Fiore 2009].

Portanto, ao conduzir os estudos sobre redes veiculares para o domínio de simulação, introduz-se um elemento intermediário complexo, representado pela necessidade de reproduzir o movimento peculiar dos veículos dentro do ambiente simulado. Por essa razão, as simulações em redes veiculares requerem dois componentes: componente de rede e componente de mobilidade. Entretanto, como os simuladores de rede tradicionais não implementam modelos de mobilidades realísticos para o contexto das redes veiculares, as etapas para simulação, em geral, envolvem dois tipos de simuladores: um simulador de mobilidade e um simulador de rede.

A Figura 4.1 ilustra o esquema geral utilizado na simulação de redes veiculares que são divididas em duas partes. A primeira é realizada no simulador de tráfego ou de mobilidade, e a segunda é realizada em um simulador de rede. Ao final da primeira parte são produzidas as entradas para segunda, que produz os dados necessários para extração dos resultados.

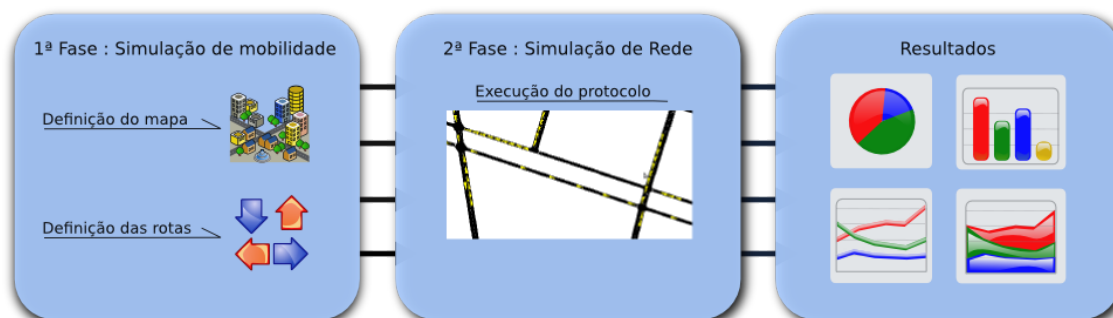


Figura 4.1: Esquema geral de simulação em redes veiculares.

Para simulação de tráfego, faz-se necessária a definição do mapa - topologia da rede que restringe a movimentação dos veículos - e a definição das rotas. Especificada a topologia da rede, é necessário definir as rotas que os veículos seguirão. Isso é importante, pois ao contrário das outras redes móveis, os veículos não se movimentam aleatoriamente.

Finalizadas as definições, surge a necessidade de um modelo de mobilidade que determine como os veículos interagirão entre si e com a topologia da rede. Como modelo de mobilidade tem um papel importante na simulação de redes veiculares a seguir são apresentados diversos modelos de mobilidade existentes e ao final do capítulo é apontado qual o modelo utilizado nesse trabalho e a justificativa dessa escolha.

4.2 Modelo de Mobilidade

Os modelos de mobilidade representam o movimento (localização, velocidade e aceleração) dos nós móveis que variam ao longo do tempo [Alam 2009].

Esses modelos são utilizados na avaliação de desempenho de aplicações e sistemas de comunicação, permitindo a análise do impacto causada pela mobilidade sobre o funcionamento dos mesmos. Por exemplo, esses modelos podem ser aplicados em diversos ambientes, tais como gestão de distribuição de chaves criptografadas, avaliação das perdas de pacotes, gestão do tráfego, avaliação do desempenho de protocolos de roteamento, predição de particionamento, descoberta de serviço em redes particionadas e avaliação de protocolos de acesso ao meio em redes *ad hoc* [Campos et al. 2004].

O modelo de mobilidade influencia de forma relevante o desempenho de uma rede veicular, como mostra o estudo realizado em [Naumov et al. 2006], cujo foco são os protocolos de roteamento. Os autores analisam o impacto no desempenho dos protocolos de roteamento causado pela mudança no modelo de mobilidade, comparando o *Random WayPoint* e um modelo de mobilidade realístico, implementado em um simulador de tráfego.

No simulador de tráfego utilizado em [Naumov et al. 2006] foram geradas vinte e quatro horas de tráfego baseado no mapa do distrito de Zurich. Na simulação são envolvidos cerca de 260.000 veículos em uma área de 250 km x 260 km e para realizar a simulação de rede foi utilizado o *Network Simulator* (NS2 - 2.28) [McCanne and Floyd]. Os *traces* gerados foram divididos em pequenas regiões e três períodos do dia foram considerados: horário de pico que tem alta densidade de veículos (mais de 50 veículos por km de pista), média densidade (entre 30 e 40 veículos/km) e baixa densidade (menos de 15 veículos/km).

Na simulação utilizando o *Random Waypoint* foi utilizada uma área de 3 km x 2 km com 550 nós. As velocidades dos nós variavam entre 15km/h e 55km/h. Para simular os três níveis de densidade foram utilizado três tempos de pausa.

Ao final da simulação dos três cenários, os autores verificaram uma grande diferença entre o desempenho dos protocolos. A taxa de entrega dos pacotes foi sempre bem superior nas simulações que utilizaram o *Random Waypoint*, nessas simulações o protocolo GSR sempre foi melhor que o AODV. Nas simulações que utilizaram o modelo de mobilidade mais realístico, os autores puderam observar uma taxa de entrega sempre abaixo dos 40%, e, ao contrário das simulações que utilizaram o *Random Waypoint*, o AODV sempre obteve melhor taxa de entrega. A Tabela 4.1

apresenta o desempenho dos protocolos de acordo com o modelo de mobilidade utilizado.

Tempo de pausa	<i>Random waypoint</i>		<i>Traces realísticos</i>	
	AODV	GPSR	AODV	GPSR
300s	99 %	99 %	34 %	13 %
200s	90 %	93 %	29 %	12 %
0s	93 %	88 %	27 %	12 %

Tabela 4.1: Taxa de entrega do AODV e GPSR. Adaptada de [Naumov et al. 2006]

Apesar dos bons resultados obtidos nas simulações que utilizaram o modelo *Random Waypoint*, tais resultados não têm valor relevante, já que o *Random Waypoint* não é capaz de representar adequadamente a mobilidade dos veículos, porque nele é considerado que os veículos se movimentam aleatoriamente, desprezando por exemplo, a limitação dos carros em relação à infra-estrutura das vias.

Sendo assim, com o desenvolvimento das redes veiculares, o modelo *Random Waypoint* deixou de ser utilizado nas simulações de redes veiculares devido a limitações citadas anteriormente e a crescente necessidade de um modelo de mobilidade capaz de representar de forma satisfatória o comportamento dos veículos.

Com isso, várias abordagens foram adotadas na modelagem da mobilidade dos veículos e, por isso, mais de uma classificação desses modelos pode ser encontrada na literatura. De acordo com [Hartenstein et al. 2010], seguindo uma classificação baseada no nível de detalhe da representação dos movimentos, os modelos são separados nas seguintes categorias:

- **Modelo Microscópico:** No modelo microscópico a movimentação de cada veículo é representada detalhadamente e sua dinâmica é tratada independentemente dos outros veículos, exceto para aqueles que estão perto o suficiente para ter um impacto direto no comportamento do motorista. Modelos microscópicos são capazes de reproduzir com uma fina granularidade situações do mundo real, como a interação com o veículo da frente, mudanças de faixa, e os encontros de fluxos em cruzamentos. Por essa razão são modelos de alta complexidade computacional.
- **Modelo Macroscópico:** Modelos macroscópicos não consideram a mobilidade de um carro específico. Nesses modelos o tráfego veicular é considerado um fluxo contínuo e apenas características relacionadas ao fluxo de veículos, como densidade e velocidade, são modeladas. Modelos macroscópicos tem a vantagem de serem de baixa complexidade computacional.

- **Modelo Mesoscópico:** O modelo mesoscópico está na fronteira dos modelos macroscópicos e microscópicos. Características individuais podem ser modeladas, mas sempre em relação a métricas macroscópicas, como por exemplo, a densidade veicular. O objetivo é se beneficiar da escalabilidade da abordagem macroscópica sem abrir mão de detalhes até então presentes apenas em modelos microscópicos.

Devido ao reduzido alcance de transmissão das tecnologias sem fio utilizadas nas redes veiculares, as simulações em redes veiculares requerem um alto nível de detalhe em termo da mobilidade dos veículos. Além disso, a precisão na ordem de metros das posições relativas e absolutas dos veículos faz com que o modelo de mobilidade mais adequado para utilização nas simulações em redes veiculares seja do domínio microscópico.

Os modelos macroscópicos e mesoscópicos são utilizados para descrever sistemas veiculares de larga escala, os quais caracterizam estradas que cobrem regiões ou países. Já os modelos microscópicos, devido ao seu alto custo computacional, geralmente são utilizado para descrever áreas menores, como cruzamentos ou uma simples rodovia [Fiore 2009].

Outra classificação dos modelos de mobilidade é proposta em [Fiore 2009], diferenciando os modelos de acordo com a natureza da representação analítica dos movimentos dos veículos:

- **Modelos estocásticos:** Nesse modelo, o movimento dos veículos é descrito no nível microscópico e é condicionado por um grafo que representa a topologia da estrada. Além disso, os movimentos são aleatórios, já que as entidades móveis seguem caminhos informais sobre o grafo, viajando com uma velocidade escolhida aleatoriamente. Os modelos estocásticos são a forma mais trivial para simular a mobilidade dos veículos e foram introduzidos por pesquisas pioneiras na área de redes veiculares. Um exemplo de modelo estocástico é o *Manhattan mobility model* [Abedi et al. 2008]. Nesse modelo é possível simular cenários com rua nos sentidos horizontal e vertical. Cada rua, por sua vez, é dividida em faixas que podem ter sentidos opostos. Em cada cruzamento o nó móvel pode optar por seguir em frente, dobrar à direita ou dobrar à esquerda. A aceleração do veículo é definida pelo usuário e a velocidade do nó é restringida pelos nós móveis que estão na mesma faixa. Os nós móveis devem manter uma distância mínima, denominada distância de segurança.

Desta forma, se dois veículos estão respeitando a distância de segurança, a velocidade do nó de trás não pode exceder a velocidade do nó da frente.

- **Modelo de fluxo de tráfego:** Nesse modelo, a mobilidade é observada em alto nível e tratada como um fenômeno contínuo. Nos modelos de fluxo de tráfego, a velocidade de um veículo é determinada de acordo com relacionamentos fundamentais da hidrodinâmica entre velocidade, densidade e vazão de um fluido. Desta forma, de acordo com a classificação anterior, podemos classificar esse como microscópico ou mesoscópico. Um exemplo de modelo de fluxo de tráfego é o *Fluid Traffic Motion* (FTM). Nesse modelo, a abordagem de fluxo de tráfego é aplicada individualmente em cada entidade móvel, explorando as métricas macroscópicas em escala microscópicas, gerando desta forma uma descrição mesoscópica. A velocidade de cada nó móvel é calculada monotonicamente em função da densidade veicular. Logo, quando o nível de congestionamento atinge um estado crítico, a velocidade dos nós móveis se aproxima da velocidade mínima permitida.
- **Modelo de carro seguinte (*Car-following models*):** Nesse modelo, o comportamento de cada veículo é calculado com base no estado (posição, velocidade e aceleração) dos veículos ao seu redor. Os primeiros modelos de carro seguinte são datados de 1950 e representam a maneira mais comum para descrever analiticamente em nível microscópico a mobilidade veicular.
- **Modelo de interação de fluxo:** Construído baseado nas interações entre veículos dos modelos estocásticos e de carro seguinte, o modelo de interação de fluxo é classificado como microscópico. A interação dos fluxos representa a dinamicidade presente nas redes veiculares, como no encontro de fluxos de veículos em cruzamentos.

Apesar dos diversos modelos de mobilidade propostos utilizarem diferentes abordagens para gerar os movimentos dos veículos ainda resta uma questão fundamental para resolver. Quando tratamos de modelos de mobilidade para redes veiculares devemos sempre pensar na questão do realismo, que é concebida como a capacidade de um modelo de voltar a produzir fenômenos de tráfego, como observado no mundo real. Em [Fiore 2009], os autores tentam responder a seguinte questão: Como validar representações de mobilidade veicular? Para responder essa questão eles realizam diversos testes, para avaliar o realismo da interação veículo-veículo e o realismo das interações de trânsito. Esses testes serão detalhados nas próximas subseções.

4.2.1 Realismo de Interações Veículo a Veículo

Para avaliar o realismo das interações entre veículos, Fiore *et. al.* realizaram três testes para verificar a capacidade dos modelos de reproduzir (1) o relacionamento entre velocidade/tráfego/densidade, (2) reações a perturbação, e (3) efeitos em onda, que são observados no mundo real.

O primeiro teste verifica a capacidade do modelo de recriar corretamente o relacionamento entre fluxo veicular, velocidade e densidade. O comportamento observado no tráfego diário envolve as seguintes dependências entre os três parâmetros [Fiore 2009]:

- **Tráfego x Densidade:** Dado uma estrada reta, com uma taxa de fluxo de carros, espera-se que à medida que essa taxa cresça, a densidade de veículos aumente. Conseqüentemente, espera-se que a taxa de saída de veículos a princípio cresça linearmente. Quando a densidade veicular aumenta até atingir um valor crítico, a quantidade de carros ultrapassa a capacidade da via, ocasionando congestionamentos e reduzindo a taxa de saída.
- **Velocidade x Densidade:** A velocidade monotônica diminui com o aumento da densidade veicular, já que o trânsito, anteriormente livre, quando a densidade veicular era baixa, vai se tornando cada vez mais congestionado à medida que o fluxo de entrada de carros cresce. Quanto mais congestionado o trânsito menor a velocidade dos carros.
- **Velocidade x Tráfego:** Sob circunstância de tráfego livre, a alta velocidade é acoplada com o baixo fluxo de saída, porque a densidade veicular é mínima. Enquanto o fluxo de saída cresce, a velocidade é reduzida ligeiramente, até que a densidade crítica seja alcançada. Então a velocidade sofre uma diminuição dramática, junto com o fluxo reduzido dos carros, devido ao congestionamento do trânsito.

Nos teste realizados em [Fiore 2009] foram avaliados cinco modelos para verificar a capacidade de reproduzir o relacionamento entre densidade, tráfego e velocidade. O modelo estocástico selecionado foi o Modelo Manhattan. Da categoria de modelo de fluxo de tráfego foi escolhido o *Fluid Traffic Motion model* (FTM) e ainda foram escolhidos três modelos da categoria modelo de carro seguinte, o *Intelligent Driver Model* (IDM), o modelo de Krauss e o modelo de Nagel-Schreckenberg. Nesse teste não foram avaliados modelos da categoria interação de fluxo, pois como eles são

baseados nas interações de veículos, o desempenho desses modelos seria exatamente igual aos dos modelos de carro seguinte.

No primeiro teste foi avaliada a relação tráfego x densidade. Neste teste apenas o Modelo Manhattan apresentou relacionamentos lineares entre os quesitos avaliados, gerando assim, um resultado não realístico. Desta forma, foi provada que a natureza estocástica do modelo não provê os detalhes necessários para reproduzir os fenômenos mais básicos observados no cotidiano do trânsito. Todos os outros modelos apresentaram resultados satisfatórios, apesar do modelo FTM ter uma restrição matemática que obriga que nenhum carro chegue a velocidade zero. Entretanto, através da calibragem de três parâmetros (velocidade mínima, densidade veicular e tamanho dos segmentos em que as vias são divididas) é possível alcançar resultados próximos do esperado.

No segundo teste, foi estudada a capacidade dos modelos reagirem a rápidas perturbações, através do monitoramento do fluxo de carros viajando em uma via de mão única. O teste consiste em avaliar o comportamento do fluxo de veículos ao encontrar a frente um veículo movendo-se lentamente.

O comportamento observado no mundo real envolve veículos desacelerando, cada um de sua forma, onde o primeiro carro a encontrar o obstáculo freia mais bruscamente, enquanto os veículos que vêm atrás reduzem de forma mais suave progressivamente, formando uma fila à medida que se aproximam do obstáculo. Então, quando o obstáculo é removido, os carros devem começar a acelerar novamente, com um incremento de velocidade que se propaga ao longo da fila.

Assim como no primeiro teste, modelos das diversas categorias foram avaliados. Os modelos escolhidos das categorias estocásticos e fluxo de tráfego foram os mesmos do primeiro teste, Modelo Manhattan e *Fluid Traffic Motion model*. Na categoria carro seguinte foram avaliados dois modelos, o IDM e o modelo de Krauss. Nenhum modelo da categoria interação de fluxo foi avaliado nesse teste pela mesma razão apresentada no primeiro teste.

Os resultados alcançados mostram que os modelos IDM e de Krauss reproduzem os comportamentos esperados. Como esperado, o perfil de velocidade dos veículos pode ser dividido em três fases: a fase inicial com tráfego livre, a fase de desaceleração induzida pelo carro parado a frente (obstáculo) e a fase de aceleração devido à remoção do obstáculo. Veículos diferentes resultam em perfis diferentes, já que cada veículo reage de acordo com o veículo à frente, introduzindo um atraso proporcional a sua posição na reta. O primeiro veículo da fila é o primeiro a frear, alcançando a menor velocidade, sendo também o primeiro a acelerar após a remoção do obs-

táculo. Os dois modelos, IDM e Krauss, apresentam comportamentos idênticos em diferentes escalas de tempo, devido a diferentes parâmetros de configurações dos dois testes.

Seguindo o modelo Manhattan, os veículos não desaceleram suavemente, mas quando se aproximam do obstáculo, em sua velocidade reduzida à mínima permitida repentinamente. Mesmo após a remoção do obstáculo, os veículos não aceleram, continuam trafegando na velocidade mínima.

A razão da desaceleração não realística é o mecanismo de evitar colisões implementado pelo modelo Manhattan, que induz os veículos a frearem bruscamente apenas quando estão bastante próximos do carro da frente. Já a falta de aceleração é devido ao modelo Manhattan não apresentar a noção de velocidade desejada, ele apenas implementa uma aceleração aleatória, por essa razão os veículos não têm qualquer incentivo para acelerar e voltar a velocidade anterior.

O modelo FTM gera apenas uma aproximação muito grosseira do comportamento correto, com veículos freando bruscamente um após o outro, na presença do obstáculo. Uma vez que o obstáculo é removido, todos os veículos apresentam uma evolução da velocidade, com incrementos e decrementos de velocidade, devido à circulação de veículos em segmentos de estrada subsequente, onde a densidade veicular é calculada de forma independente.

Durante os congestionamentos podem ser produzidas ondas de lentidão, que se movem no sentido contrário ao movimento dos veículos, à medida que o tempo passa. Esse tipo de evento geralmente ocorre em longas retas, como rodovias.

Momentos antes de uma onda de congestionamento, todos os veículos estão trafegando em alta velocidade e uniformemente espaçados, essas são às condições ótimas de tráfego. Após algum período de tempo, um dos veículos começa a desacelerar, por algum motivo (e.g., erro humano, o veículo deve entrar em uma pista lateral, ou semáforo indicando sinal vermelho). Essa desaceleração introduz uma perturbação que é propagada para os veículos de trás, os quais são forçados a diminuir a velocidade. À medida que o tempo passa, esse evento avança em direção contrária ao movimento dos veículos, atingindo carros cada vez mais distantes do veículo que iniciou o evento. Desta forma, quando o veículo que iniciou está pronto para voltar a acelerar, uma fila de veículos já está formada. As consequências de uma onda de lentidão, variam de acordo com a densidade veicular, que define a quantidade de veículos que vão participar desse evento.

O terceiro teste realizado em [Fiore 2009] tem como objetivo verificar a capacidade de cada um dos modelos de recriar ondas de lentidão. Nesse teste foram

testados quatro modelos, o Modelo Manhattan representando a categoria dos modelos estocásticos, o FTM representando a categoria de modelos de fluxo de tráfego e dois modelos da categoria carro seguinte, sendo um deles baseado em autômatos celulares, o IDM e o Nagel-Schreckenberg. Por razões citadas nos testes anteriores, não foram utilizados modelos de interações de fluxo neste teste. Mais uma vez foi observado que os modelos de carro seguinte foram os mais fiéis aos eventos do mundo real, conseguindo recriar o evento em questão. Apesar do modelo FTM apresentar transições de velocidade, ele não foi capaz de gerar ondas de lentidão. Esse fato é consequência direta das características do modelo que faz com os veículos em um mesmo segmento sempre trafeguem com a mesma velocidade. Já o modelo Manhattan falhou completamente no teste, já que os veículos não foram afetados pelo aumento da densidade veicular, mantendo-se consistente com os resultados do primeiro teste. Logo, mesmo com o trânsito congestionado, o modelo Manhattan gera movimentos veiculares com velocidade constante.

4.2.2 Realismo das Interações entre Fluxos

Na subseção anterior foram apresentados os testes realizados para avaliar o nível de realismo das interações entre veículos. Nesta seção serão apresentados os testes realizados para avaliar interações entre fluxos. Um exemplo desse tipo de interação é o encontro de fluxos de veículos em um cruzamento.

Para avaliar o realismo das interações de fluxo, os autores de [Fiore 2009] realizaram dois testes. O primeiro teste foi baseado na observação da velocidade dos veículos ao se aproximarem e ao se distanciarem de um cruzamento. O segundo teste foi realizado através do monitoramento do comportamento da densidade veicular em uma via de topologia simples.

No primeiro teste foram registradas as velocidades dos veículos ao se aproximarem do cruzamento. No mundo real ao se aproximarem de um cruzamento, os veículos reduzem sua velocidade, podendo inclusive parar completamente, até que seja possível atravessar o cruzamento e ao atravessar o cruzamento, o veículo volta a acelerar.

Nesse teste foi avaliado um modelo de cada categoria. Representando a categoria dos modelos estocásticos foi escolhido o modelo Manhattan, representando a categoria de fluxo de tráfego, o escolhido foi o FTM, o representante dos modelos de carro seguinte foi o IDM e o modelo escolhido da categoria de interações de fluxo foi IDM-IM.

Os resultados mostram que o modelo Manhattan ignora completamente o cruzamento, mantendo praticamente a mesma velocidade durante todo trajeto.

Assim como o modelo Manhattan, o FTM também ignora completamente a presença do cruzamento. A variação da velocidade dos veículos observada no FTM, deve-se a maneira de como os cruzamentos são modelados. Já que como os cruzamentos são compostos por dois segmentos, os veículos alteram sua velocidade de acordo com a variação da densidade veicular.

O modelo IDM também negligencia a existência de cruzamentos, porém os resultados demonstram a diminuição acentuada da velocidade média dos veículos exatamente no centro do cruzamento. Esse fato é uma consequência direta das restrições dos modelos de carro seguinte, pois modelos dessa categoria não permitem a ultrapassagem de veículos. Por isso, quando dois fluxos independentes se encontram em um cruzamento, para que os veículos que estão em uma mesma faixa não se sobreponham, o modelo obriga que um deles pare completamente e volte a se movimentar após o outro. O modelo IDM-IM foi o único que apresentou um comportamento realístico. Ele força os veículos a desacelerarem, pararem e acelerarem à medida que eles atravessam o cruzamento.

No segundo teste os autores mediram a densidade veicular média em uma rede de topologia simples, usando diversos modelos de mobilidade. Para realizar esse teste foi utilizada uma via no formato de grade 3 x 3 composta por quatro cruzamentos, conectados por ruas de 250m. O teste é iniciado com 20 veículos/km/rua que foi considerado uma condição razoável de tráfego, sem a presença de congestionamento. No mundo real, em um cenário como esse é esperado uma alta densidade de veículos nos arredores do cruzamento, onde ocorre a formação de filas e baixa densidade veicular ao longo da rua onde os veículos podem trafegar em alta velocidade.

Nesse teste foram comparados os seguintes modelos: *Constant Speed Motion* (CSM) e o Manhattan, representando a categoria dos modelos estocásticos. Representando a categoria de fluxo de tráfego e carro seguinte foram utilizados o FTM e o IDM respectivamente. Para representar a categoria dos modelos de interações de fluxos foram escolhidos os seguintes modelos:

1. CSM com pausa, que força os veículos a pararem antes de passarem pelo cruzamento.
2. Três versões do IDM-IM: o IDM-IM com paradas, que assim como o CSM força os veículos a pararem nos cruzamentos; o IDM-IM com semáforos, onde os fluxos nos cruzamentos são controlados por semáforos; e o IDM-IM com

múltiplas faixas, que é semelhante ao IDM-IM com semáforos, diferindo apenas por permitir múltiplas faixas em uma mesma rua.

3. O modelo *Minimizing Overall Braking Induced by Lane-changes* (MOBIL), baseado no IDM-IM com múltiplas faixas. A diferença entre eles é a maneira como os veículos mudam de faixa. Enquanto no IDM-IM força os veículos a percorrerem uma faixa escolhida randomicamente, o MOBIL permite que os veículos mudem de faixa, desde que uma condição de segurança seja satisfeita.

Por não tratar de maneira especial os cruzamentos, os modelos CSM, Manhattan, FTM e IDM não apresentaram a diferença de densidade veicular esperada quando comparados a densidade veicular nos cruzamentos com a densidade veicular das ruas. A diferença de densidade observada resultou da sobreposição de densidades devido ao encontro de duas ruas.

O IDM apresentou uma diferença bastante acentuada nos cruzamentos por não permitir a ultrapassagem, mesmo problema ocorrido no teste anterior. Como o IDM força o veículo a parar completamente no cruzamento, a densidade veicular média observada no centro dos cruzamentos foi bastante alta, entretanto, esse comportamento não representa um comportamento realístico.

Por outro lado, todos os modelos baseado em interação de fluxo geram uma densidade veicular maior nos arredores dos cruzamentos. Entretanto, os valores registrados variaram bastante de acordo com o modelo e em especial no CSM com pausa. Como o modelo CSM com pausa é um modelo estocástico, ele não leva em consideração as interações entre veículos. Logo, quando os veículos se aproximam dos cruzamentos, ao invés do modelo gerar uma fila, ele cria uma pilha, resultando em uma densidade veicular não realística nos cruzamentos. Ao comparar os modelos baseados do IDM, os resultados são diferentes, visto que nesse tipo de modelo as interações entre veículos permitem a criação de filas no cruzamentos. Ainda assim foram encontrados diferentes resultados.

No modelo IDM com pausa foi registrada uma alta densidade nas proximidades dos cruzamentos, gerando congestionamento e, por consequência, reduzindo a capacidade total do sistema. Por outro lado, o IDM com semáforos apresentou uma redução nas filas e, conseqüentemente, uma redução da densidade veicular.

Os modelos com múltiplas faixas (IDM-IM com múltiplas faixas e MOBIL) reduziram ainda mais as filas de veículos. Entretanto, os picos de densidade são mais próximos dos cruzamentos, devido às múltiplas faixas, pois elas permitem a presença de mais veículos ao mesmo tempo nos cruzamentos. Devido à baixa frequência de

mudança de faixa registrada no teste, nenhuma diferença relevante foi notada ao comparar os resultados do IDM-IM com múltiplas faixas e do MOBIL.

A partir dos resultados dos testes pode-se concluir que os modelos estocásticos não são capazes de reproduzir realisticamente o comportamento dos veículos. Já os modelos de fluxo de tráfego conseguem reproduzir parcialmente o comportamento dos veículos, apresentando resultados aceitáveis para fenômenos de larga escala. Porém, em eventos em nível microscópico o resultado observado diverge do observado no mundo real. Logo, modelos de fluxo de tráfego também não são ideais para o estudo das redes veiculares.

Os modelos carro seguinte alcançaram resultados bastante satisfatórios, representando fielmente o comportamento observado no mundo real. Entretanto, em cenários com a presença de cruzamentos, esses modelos necessitam de um mecanismo para gerenciar os cruzamentos, já que esse aspecto é particularmente importante nos ambientes urbanos, típicos das redes veiculares.

Visando alcançar um grau de realismo satisfatório nas simulações desta dissertação, a escolha da ferramenta que realizará as simulações de mobilidade foi baseada principalmente no tipo de modelo de mobilidade capaz de ser provido pela ferramenta.

4.3 *Simulation of Urban MObility* (SUMO)

O SUMO [SUMO 2009] é um simulador de mobilidade de código aberto e altamente portátil. Ele foi desenvolvido com o intuito de fornecer uma plataforma para testes e comparações entre modelos de mobilidade. Para alcançar esse objetivo, ao longo do tempo foram adicionadas funcionalidades ao SUMO. Na versão atual, algumas das características são:

- Gera movimentos de veículos livres de colisões;
- Permite a definição de vários tipos de veículos;
- Permite o roteamento individual dos veículos;
- Permite o uso de vias com várias faixas;
- Permite o uso de topologias complexas (10.000 ruas); e
- Importa vários formatos de arquivos de definições de rede (OpenStreetMap, Visum, Vissim, ArcView, XML-Descriptions).

Além dessas características, outra característica essencial do SUMO é o modelo de mobilidade utilizado por ele para reproduzir a movimentação dos veículos. O SUMO utiliza como modelo de mobilidade o Krauss β *car-following*, um modelo de carro seguinte que, conforme justificado anteriormente na Seção 4.2.2, é capaz de reproduzir de maneira satisfatória a movimentação dos veículos. Por ser um modelo de carro seguinte, alguns mecanismos são necessários para que as interações de fluxos sejam realizadas de maneira satisfatória. Além disso, o SUMO possibilita o uso de semáforos para auxiliar no controle de fluxo, tornando assim a movimentação dos veículos mais próxima da observada no mundo real. Essas características somadas a uma melhor documentação, a uma comunidade mais ativa de usuários e a trabalhos científicos desenvolvidos usando o SUMO [Karnadi et al. 2007] [Piorkowski et al. 2008] [Wegener et al. 2008] são as razões da escolha do SUMO para ser o simulador de mobilidade desse trabalho ao invés do VanetMobSim [VanetMobSim 2009], outro simulador de mobilidade capaz reproduzir a movimentação dos veículos satisfatoriamente e também compatível com a ferramenta NS2.

Para realizar uma simulação no SUMO são necessários dois arquivos de entrada: o arquivo que contém a definição da rede e o arquivo com a definição das rotas. A Figura 4.2 ilustra os passos que geralmente são usados nas Simulações, assim como o relacionamento entre as entradas e saídas dos programas contidos no SUMO.

O primeiro programa *netconvert*, converte o mapa definido pelo usuário para o formato aceito pelo SUMO, o *net.xml*. A entrada do *netconvert* são dois arquivos, um contendo as descrições do nós ou cruzamentos (*nodes.xml*) e outro arquivo que contém as informações das arestas (*edge.xml*). Esses dois arquivos em conjunto descrevem a topologia da rede. O segundo programa, *duarouter*, recebe como entrada o arquivo de definição da rede (*net.xml*) e o arquivo *flow.xml*, que contém as origens e os destinos das rotas que serão criadas.

Com o arquivo de rotas e o arquivo de definição da rede, o SUMO está apto a realizar a simulação. Quando realizada a simulação, o SUMO gera um arquivo de saída (*netstate.xml*) com as informações da simulação. Nesse arquivo estão as estatísticas da simulação com informações sobre todas as vias e suas faixas, além de informações sobre cada veículo para cada instante da simulação.

Sendo o SUMO o simulador de mobilidade (Fase 1 da Figura 4.1), para que a simulação de rede seja realizada é necessária a conversão dos arquivos gerados pelo SUMO para um formato compatível com o simulador de rede (Fase 2 da Figura 4.1). Neste trabalho, o simulador de rede escolhido foi o *Network Simulator 2* (NS2 - 2.34) por ser um simulador amplamente utilizado na literatura para simulações de redes *ad*

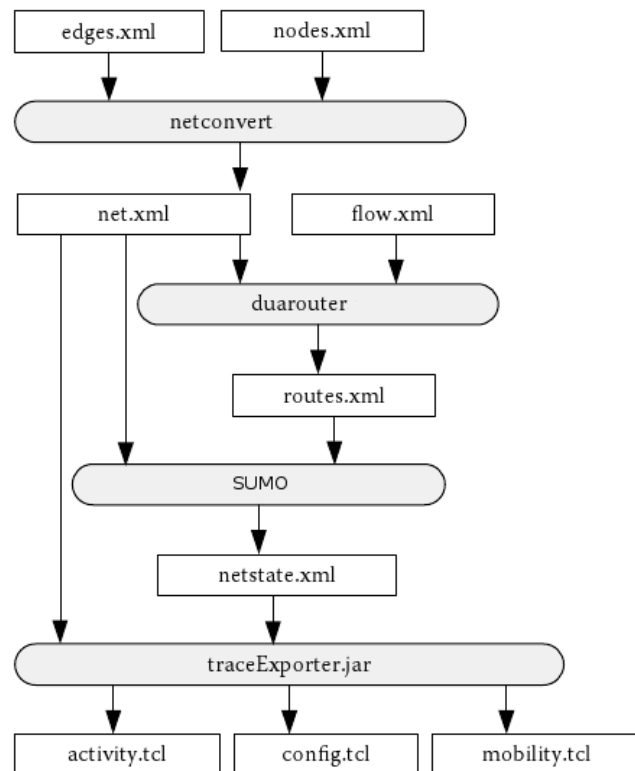


Figura 4.2: Esquema geral de simulação no SUMO [Gongjun Yan and Weigle 2009].

hoc, por ser um programa de código aberto e, principalmente, pela compatibilidade com o SUMO. O SUMO fornece uma ferramenta para conversão em um formato aceito pelo NS2, chamada *traceExporter.jar*. Essa ferramenta recebe o arquivo de saída da simulação e gera os arquivos necessários para realizar a simulação de rede no NS2: *activity.tcl*, *config.tcl* e *mobility.tcl*.

4.4 Conclusão

Dada a necessidade de representar os movimentos dos veículos de forma próxima ao observado no mundo real, vários modelos de mobilidades foram propostos ao longo do desenvolvimento das redes veiculares. Entretanto, nem todos os modelos são capazes de prover um grau de realismo satisfatório para a simulação de redes veiculares. Estudos realizados em [Fiore 2009] mostraram que os modelos de carro seguinte e os modelos de interação de fluxos são os mais indicados para a simulação em redes veiculares.

Assim como os modelos de mobilidade, os simuladores de tráfego foram evoluindo acompanhando o desenvolvimento das redes veiculares. Contudo, apenas alguns de-

les são capazes de prover modelos de mobilidade satisfatórios para a simulação das redes veiculares. Dentre essas ferramentas destaca-se o SUMO, escolhido para ser usado nesta dissertação, que além de implementar um modelo de mobilidade considerado realístico, Krauss β *car-following*, possui código fonte livre, é amplamente utilizado e é compatível com o *Network Simulator 2*.

Logo, pode-se concluir que atualmente as ferramentas existentes para a simulação de redes veiculares são capazes de realizar experimentos com grau de realismo suficiente para garantir a validação dos experimentos.

Capítulo 5

Análise das Simulações

Baseado no que foi descrito nos capítulos anteriores, pode-se concluir que o roteamento ainda é um dos grandes desafios das redes veiculares. Assim, é necessário analisar o desempenho dos protocolos de roteamento para redes veiculares propostos na literatura, com foco neste trabalho nos cenários urbano e de rodovia. Para isso, as implementações e as suas respectivas simulações são realizadas e os resultados destas simulações são analisados.

Inicialmente, na Seção 5.1 apontamos e discutimos as principais limitações dos protocolos escolhidos em relação ao cenário. Em seguida, na Seção 5.2 apresentamos a importância de um estudo do impacto da densidade de veículos no desempenho dos protocolos de roteamento em redes veiculares. Na Seção 5.3 é apresentado o modelo de rede utilizado nas simulações. Na Seção 5.4 são definidos os cenários utilizados como estudo de caso dos cenários urbanos e de rodovia presentes nas redes veiculares, bem como a descrição em detalhes dos parâmetros utilizados nas simulações realizadas. Na Seção 5.5 são apresentados e analisados os resultados das simulações. Na Seção 5.6 apresentamos uma discussão sobre os resultados das simulações. Por fim, na Seção 5.7 estão as considerações finais sobre os resultados obtidos nas simulações.

5.1 Limitações dos Protocolos de Roteamento

Conforme exposto no Capítulo 2, as redes veiculares são caracterizadas por sua diversidade de cenários e estes cenários possuem uma forte influência do padrão de mobilidade dos veículos que, por sua vez, está diretamente relacionado ao grau de conectividade e dinamicidade da rede veicular. Em seguida, através da revisão bibliográfica dos principais protocolos de roteamento para redes veiculares no Capítulo

3, mostrou-se que cada protocolo possui uma série de peculiaridades e limitações em relação ao cenário de aplicabilidade. No Capítulo 4 foi então apresentada a importância do modelo de mobilidade adotado em simuladores de rede no desempenho dos protocolos de roteamento.

É importante ressaltar ainda que devido à grande variedade de cenários existentes, sejam estes dinâmicos (e.g., veículos em alta velocidade em uma rodovia) ou estáticos (e.g., veículos parados durante uma hora em um congestionamento), os diversos protocolos de roteamento projetados têm como objetivo solucionar um ou mais problemas específicos de cada cenário.

Neste capítulo, nós classificamos os protocolos que utilizam informações de um cenário particular como um protocolo específico e, de forma contrária, um protocolo que pode ser estendido aos mais diversos cenários como não-específico.

Pode-se definir o grau de especificidade do protocolo de acordo com as considerações utilizadas para realizar o roteamento (e.g., utilização de GPS e mapas digitais), assim como em função das problemáticas que pretendem ser superadas. Como exemplo temos as soluções voltadas para os problemas ocasionados pelas frequentes desconexões presentes nos cenários urbanos [Mo et al. 2006], [Taleb et al. 2007] e [Zhao and Cao 2008].

Seguindo ainda outra abordagem, [Zhang and Wolff 2008] propõem uma solução para superar a ausência de conectividade típica dos cenários rurais.

Algumas das propostas de roteamento para redes veiculares destacam de maneira evidente o cenário adotado pelo protocolo, como é o caso do *Multi-hop Routing Protocol for Urban Vanets* [Mo et al. 2006]. Em outros protocolos, apesar dos autores não deixarem de forma tão evidente qual o cenário adotado, é possível identificar o cenário a partir das características e do funcionamento do protocolo. Por exemplo, em cenários de rodovia e rural a presença de cruzamentos é rara. Logo, os protocolos que utilizam estratégias baseadas em cruzamento para realizar o roteamento, tais como [Lochert et al. 2003] [Tian et al. 2003] [Lochert et al. 2005], dificilmente apresentarão um desempenho satisfatório nesses dois cenários, independentemente da densidade veicular, da velocidade dos nós, dentre outros fatores.

Conforme citado na Seção 3.3.2, o protocolo SAR [Seet et al. 2004] se beneficia da presença constante de transporte público nas vias, mais especificamente dos ônibus, para realizar o roteamento. Entretanto, em rodovias e vias rurais, sabe-se que a frequência desse tipo de veículo é menor quando comparada aos cenários urbanos. Portanto, não se espera um bom desempenho do SAR em cenários de rodovia e rurais.

Naumov e Gross [Naumov and Gross 2007] propõem o protocolo CAR para realizar o roteamento em dois tipos de cenário: urbano e rodovia. Entretanto, apesar da proposta do protocolo definir estes dois cenários de aplicação, o funcionamento desse protocolo varia basicamente de acordo com a densidade veicular, o que o torna menos específico. Conforme citado na Seção 3.3.6, para estimar a densidade são utilizadas mensagens periódicas. Apesar dessas mensagens terem sua frequência de envio adaptada ao número de vizinhos, ainda assim o protocolo apresenta uma alta sobrecarga da rede, principalmente quando comparado aos outros protocolos que não utilizam mensagens periódicas.

A densidade veicular também é um fator determinante para o correto desempenho do protocolo de roteamento AVR [Azarmi et al. 2008], apresentado na Seção 3.3.8. O protocolo proposto por Azarmi *et al.* varia o raio de transmissão do nó e o tamanho dos pacotes de acordo com o valor da densidade veicular. Entretanto, em cenários onde a variação da densidade veicular é mínima, como no cenário rural, o AVR não é capaz de se adaptar. Logo, conclui-se que o AVR não é aplicável no cenário rural.

Apesar do MURU ter sido desenvolvido para o cenário urbano, ele apresenta uma métrica (EDD) mais genérica que os demais protocolos. Para calcular o EDD são utilizadas informações sobre a velocidade e a direção dos nós, bem como sua posição. Estas informações são usadas para calcular o menor caminho e para prever se dois nós serão vizinhos em um determinado tempo. Ao aplicarmos o MURU no ambiente de rodovia, por exemplo, o cálculo do EDD tende a ser mais simples, pois um dos fatores que influencia significativamente no seu cálculo é a possibilidade de um veículo mudar de direção, ou seja, dobrar em um cruzamento. Essas situações são raras no cenário de rodovia. Entretanto, a partir desse fato não se pode concluir que o desempenho do MURU em cenários de rodovia será melhor ou pior do que em cenários urbanos.

Taleb *et al.* [Taleb et al. 2007] não definem o cenário de aplicação do ROMSGP. Assim, como o MURU, o ROMSGP também utiliza uma métrica genérica para a escolha do melhor caminho, o LET. Para calcular o LET são utilizadas informações sobre a velocidade, posição e raio de transmissão dos veículos que estão se comunicando. Outra característica relevante do ROMSGP é o agrupamento de veículo, que é realizado de acordo com a direção do movimento dos veículos. O protocolo procura garantir que os caminhos escolhidos sejam compostos por veículos que estão se movendo juntos, ou seja, na mesma direção e com velocidades semelhantes. Intuitivamente, a chance de encontrarmos caminhos como esses é maior nos cenários

de rodovia, pois nesses cenários os nós se movem basicamente em duas direções, uma oposta à outra. Além disso, a ausência de semáforos e cruzamentos favorecem a existência desse tipo de caminho, pois dessa forma é mais raro um veículo mudar drasticamente de direção. Contudo, assim como foi mencionado anteriormente para o MURU, não se pode afirmar que a escolha desse tipo de caminho é mais adequada para o cenário urbano ou de rodovia.

Em resumo, vários protocolos propostos para solucionar o desafio de realizar o roteamento em redes veiculares são específicos para o cenário urbano, impossibilitando dessa forma a sua aplicação no cenário de rodovia. No entanto, outros protocolos utilizam métricas que combinam diversas informações de mobilidade para realizar o roteamento. Contudo, apesar de serem métricas de caráter mais geral, o bom desempenho do protocolo também não é garantido. Seguindo outra abordagem, alguns protocolos, os quais chamamos de protocolos de caráter geral, utilizam métricas menos específicas possibilitando assim a utilização deles em outros cenários. Dentre essas métricas podemos destacar a densidade, que influencia diretamente na movimentação dos nós independentemente do cenário. Contudo, o fato de utilizar a densidade como métrica para tomada de decisões do roteamento não garante o bom desempenho do protocolo.

5.2 A Importância da Densidade Veicular

Através do estudo dos protocolos de roteamento em função do cenário, identificamos que uma característica da rede é determinante no desempenho de todos os protocolos de roteamento projetados para redes veiculares. Esta característica comum é a *densidade veicular*, ou seja, o número de veículos que forma a rede veicular.

Conforme discutimos anteriormente no Capítulo 2, a densidade veicular é capaz de afetar diversas outras características da rede, tais como: a conectividade da rede, o grau de dinamicidade da rede e a mobilidade dos veículos. Por exemplo, com o aumento do número de veículos em uma via é esperado que a velocidade média dos veículos diminua, chegando próximo de zero em situações extremas como acidentes na via e congestionamentos. Nesse contexto, a rede torna-se menos dinâmica, devido à dificuldade de movimentação dos veículos, e, por consequência, os enlaces tornam-se mais estáveis. Seguindo esse mesmo raciocínio, quando a densidade veicular diminui, os veículos tendem a se mover mais rapidamente pela via, aumentando dessa forma a dinamicidade da rede e tornando os enlaces bastante instáveis.

Contudo, conforme veremos neste capítulo, a variação da densidade veicular não

influencia da mesma forma os cenários de redes veiculares. Em cenários urbanos, os cruzamentos com semáforos tendem a concentrar um maior número de veículos, enquanto regiões sem sinalização apresentam maior fluidez do tráfego. Nesse caso, a concentração de veículos em regiões próximas aos cruzamentos contribui para acentuar a distribuição não uniforme de veículos na rede. Já em cenários de rodovia, os veículos são distribuídos quase que uniformemente ao longo das vias, principalmente devido à ausência de regiões concentradoras de veículos. Essa característica permite maior fluidez do tráfego nas vias.

Sendo assim, apesar de hoje os protocolos serem desenvolvidos para superar problemáticas específicas de cada cenário, espera-se que no futuro os protocolos sejam desenvolvidos para apresentar um bom funcionamento nos mais variados tipos de cenário. Em resumo, espera-se que os protocolos que hoje são desenvolvidos como *protocolos específicos* passem a ser desenvolvidos como *protocolos de caráter geral*, ou seja, protocolos que considerem métricas que possam ser analisadas independentemente do cenário da rede.

Como primeiro passo para essa mudança, nós propomos nesse trabalho identificar através de simulações o impacto da densidade veicular, da carga da rede e do padrão de mobilidade no desempenho de um protocolo de roteamento. É imprescindível entender a relação entre a densidade veicular e o cenário de aplicação no desempenho de um protocolo de roteamento. O objetivo principal é que os resultados alcançados neste trabalho forneçam diretrizes para os projetistas de redes veiculares desenvolverem protocolos de roteamento eficientes capazes de se adaptar aos cenários urbano e de rodovia. Para isso, as implementações e as respectivas simulações em cada cenário são realizadas.

5.3 Modelo da Rede

Para realizar a simulação dos protocolos de roteamento escolhidos é necessário assumir algumas condições relacionadas aos recursos disponíveis em cada veículo, bem como algumas propriedades das redes veiculares. Dessa forma, as condições assumidas nos estudos de caso avaliados e as propriedades das redes veiculares podem ser modeladas da seguinte forma:

1. Seja n_i um i -ésimo nó em uma rede veicular e N o número total de veículos da rede, cada nó n_i pode se comunicar apenas com seus vizinhos através de transmissões sem fio.

2. Considerando G_i o grupo de vizinhos do nó n_i , $n_j \in G_i$ se $d_{ij} < r_i$, seja d_{ij} a distância entre os nós n_i e n_j , e r_i o raio do alcance de n_i .
3. Cada grupo consiste em uma subrede que pode ser interconectada a outra se $n_j \in G_i$ e $n_j \in G_k$. Nesses casos, n_j pode atuar como um *gateway* entre as duas subredes.
4. Cada veículo $n_i \in N$ é capaz de conhecer sua posição. Assume-se que cada veículo possui um mecanismo de posicionamento global capaz de prover tal informação.
5. Assume-se que um serviço de localização pode ser utilizado para descobrir a posição do nó de destino sem que tal serviço influencie no desempenho da rede.
6. Dado n_i e n_j pertencentes a N , não necessariamente existe um caminho entre os dois para o envio de mensagens. Logo, nem todo nó pertencente a N é alcançável.

5.4 Ambiente de Simulação

Com o objetivo de aproximar ao máximo a avaliação dos resultados em simuladores com o mundo real, neste trabalho são utilizados mapas do formato *OpenStreetMap* (OSM) [openstreetmap 2009b]. O *Open Street Map* é um formato de mapa livre e editável que possibilita o uso de dados geográficos de qualquer lugar do mundo de maneira colaborativa.

Um arquivo no formato OSM contém a descrição do mapa com riqueza de detalhes. Nele é possível encontrar informações descrevendo características da via, tais como: velocidade mínima, velocidade máxima, número de faixas, o grau de prioridade da via e sinalização de trânsito através de semáforos.

Os mapas do formato OSM utilizados nas simulações deste trabalho são baseados em mapas reais e estão disponíveis em [openstreetmap 2009a]. Através do site da *OpenStreetMap*, o usuário pode exportar um mapa real de qualquer cidade do mundo, desde que seu mapa tenha sido descrito no formato OSM. Como mencionado no Capítulo 1, neste trabalho focamos a análise dos protocolos nos cenários urbano e de rodovia devido à maior semelhança entre eles, já que nesses cenários a densidade veicular esperada é alta, ao contrário do cenário rural. Além disso, nos cenários urbano e de rodovia, os veículos estão sujeitos a congestionamentos o que raramente

Cenário de Rodovia

O cenário de rodovia apresenta uma disposição mais simples das vias. Para representar esse cenário, nesse trabalho utilizaremos uma rodovia hipotética de oito quilômetros de comprimento e oito faixas de veículos, quatro para cada sentido. A Figura 5.2 ilustra o cenário utilizado neste trabalho.

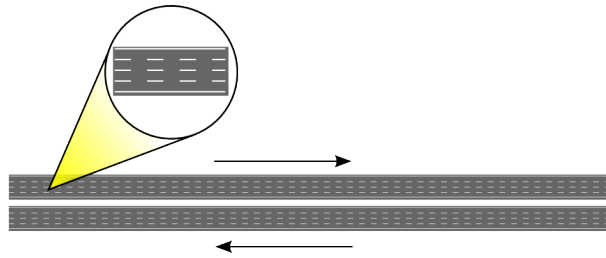


Figura 5.2: Mapa do cenário de rodovia.

5.4.2 Protocolos de Roteamento Simulados

O objetivo deste trabalho é analisar o impacto da densidade veicular, da carga da rede e da mobilidade dos nós no roteamento em redes veiculares. Para avaliar o impacto da mobilidade dos nós são realizadas simulações no cenário urbano e no cenário de rodovia. Sendo assim, a escolha dos protocolos que serão implementados e simulados é extremamente importante. Afinal, como mencionado na Seção 5.1, grande parte dos protocolos de roteamento para redes veiculares existentes na literatura é específica para um cenário e ao utilizar esses protocolos em cenários diferentes do proposto pelos seus autores espera-se que os mesmos apresentem um desempenho ruim. Por essa razão, nós escolhemos dentre os protocolos apresentados na Seção 5.1 aqueles que apresentam caráter geral, ou seja, aqueles que utilizam métricas que podem ser medidas e analisadas independentemente do cenário onde o protocolo está sendo aplicado. Logo escolhemos os protocolos MURU e ROMSGP para serem implementados e utilizados nas simulações.

Além de serem os protocolos que utilizam métricas menos específicas dentre os apresentados, os protocolos MURU e ROMSGP compartilham algumas características que possibilitam uma comparação mais justa dos mesmos. A Tabela 5.1 apresenta as características desses protocolos de forma resumida.

Primeiramente, ambos os protocolos são reativos e são baseados em posição, pois eles utilizam informações sobre a mobilidade dos nós durante o roteamento. Outra característica comum aos dois protocolos é a utilização de GPS, que é utilizado pelos

Características	MURU	ROMSGP
Protocolo reativo	✓	✓
Baseado em posição	✓	✓
Utiliza GPS	✓	✓
Utiliza mecanismo para evitar sobrecarga	✓	✓
Necessita de mapas digitais	✓	
Agrupar veículos		✓

Tabela 5.1: Comparação entre o MURU e o ROMSGP.

veículos para saberem sua posição atual. Além disso, com o objetivo de evitar o congestionamento da rede, o MURU e o ROMSGP implementam mecanismos para diminuir o número de pacotes de controle.

Apesar de algumas semelhanças, o MURU e o ROMSGP apresentam características diferentes. Enquanto o MURU necessita de mapas externos para calcular sua métrica principal, o ROMSGP não utiliza mapas. Além disso, o ROMSGP utiliza uma estratégia de agrupamento dos veículos baseada na direção do movimento deles.

Para avaliarmos o desempenho do MURU e do ROMSGP em relação à mudança de cenário, nós comparamos seus resultados com os obtidos através da simulação do protocolo AODV [Perkins and Royer 1999] e do protocolo DSR [Johnson et al. 2001]. O protocolo AODV foi escolhido por se tratar de um protocolo legado bastante conhecido pela comunidade acadêmica e que possui resultados significativos em cenários com mobilidade dos nós. Outro protocolo utilizado na comparação é o DSR que, assim como o AODV, é um protocolo de roteamento reativo. O DSR foi escolhido por se tratar de um protocolo que apresenta melhor desempenho em cenários com baixa carga e/ou baixa mobilidade, diferentemente do AODV [Perkins et al. 2001].

5.4.3 Mobilidade

Na avaliação dos protocolos MURU, ROMSGP, AODV e DSR são utilizados dois cenários, um cenário urbano e um cenário de rodovia. Com o intuito de tornar esses cenários mais realísticos, representamos alguns dos diversos perfis de motoristas através das definições de tipos de veículos. Como não se pode definir ao certo quantos perfis de motoristas existem, optamos por utilizar três perfis: motoristas lentos, motoristas em velocidade média e motoristas rápidos. Para isso nos baseamos na velocidade máxima das vias urbanas de trânsito rápido brasileiras que é 80 km/h [Denatran 2010a]. A partir desse valor definimos um perfil para veículos que

sempre trafegam abaixo desse valor e um perfil que representa motoristas infratores, que podem alcançar até 120 km/h.

O simulador de tráfego utilizado neste trabalho, o SUMO, permite que sejam definidos os tipos de veículos da rede. Para isso devem ser definidos valores para as seguintes propriedades: velocidade máxima, aceleração, desaceleração e comprimento do veículo. Neste trabalho definimos três tipos de veículos. Os valores utilizados para cada tipo de veículo estão listados na Tabela 5.2.

Tipo	Velocidade máxima	Aceleração	Desaceleração	Comprimento do Veículo
Tipo 1	120 km/h	9.7 km/h ²	4.5 km/h ²	7.5 m
Tipo 2	80 km/h	9 km/h ²	4.5 km/h ²	7.5 m
Tipo 3	60 km/h	7.7 km/h ²	4.5 km/h ²	7.5 m

Tabela 5.2: Parâmetros de cada tipo de veículo.

5.4.4 Parâmetros do Simulador de Rede

Os parâmetros utilizados no simulador de rede NS-2 (versão 2.33) estão listados nas Tabelas 5.3 e 5.4. Quando um parâmetro é variado (apenas um deles é variado por vez), os demais assumem os valores destacados entre colchetes. O parâmetro variado assume os valores definidos nas tabelas.

Para tornar os cenários simulados mais realistas, nós definimos os parâmetros referentes ao comportamento dos veículos o mais próximo possível ao observado no mundo real, como foi mencionado na subseção 5.4.3. Em relação ao parâmetro raio de transmissão levamos em consideração três aspectos: o raio de transmissão máximo de dispositivos de comunicação sem fio, em geral 250m em condições ótimas; testes realizados em [Lochert et al. 2003] com dispositivos de comunicação sem fio 802.11b utilizando antenas externas - nesses testes os autores demonstraram que é possível que veículos se comuniquem em um raio de até 800m utilizando antenas externas; e as dimensões dos cenários já que com alcance maior um veículo poderia cobrir toda a área de simulação. Sendo assim, adotamos o valor intermediário de 400m para o raio de transmissão.

Para definir o parâmetro número de nós da simulação tivemos que lidar com algumas limitações técnicas dos simuladores utilizados. Como citado na Seção 4.3, foi utilizado o SUMO para realizar a simulação de tráfego ou de mobilidade e o NS2 para realizar a simulação de rede, entretanto, devido a uma divergência entre eles o procedimento de simulação tornou-se mais complexo.

Parâmetro	Valor
Aplicação	Tráfego CBR
Protocolos MAC/Físico	IEEE 802.11
Dimensão do cenário	1 km x 1 km
Raio de transmissão	400 m
Modelo de mobilidade	<i>Kraussβ car-following</i>
Modelo de propagação	<i>TwoRayGround</i>
Velocidade máxima dos nós	120 km/h
Tempo de simulação	200 s
Quantidade de nós	100 - 500 [100, 300 e 500]
Quantidade de nós fontes	10% - 60% [10%, 30% e 50%]
Intervalo entre envios	0.5 s

Tabela 5.3: Parâmetros de simulação para o cenário urbano.

Parâmetro	Valor
Aplicação	Tráfego CBR
Protocolos MAC/Físico	IEEE 802.11
Dimensão do cenário	8 km x 2 km
Raio de transmissão	400 m
Modelo de mobilidade	<i>Kraussβ car-following</i>
Modelo de propagação	<i>TwoRayGround</i>
Velocidade máxima dos nós	120 km/h
Tempo de simulação	300 s
Quantidade de nós	100 - 500 [100, 300 e 500]
Quantidade de nós fontes	10% - 60% [10%, 30% e 50%]
Intervalo entre envios	0.5 s

Tabela 5.4: Parâmetros de simulação para o cenário de rodovia.

Em resumo, a limitação técnica está relacionada com a maneira com que os simuladores criam os nós na simulação. Enquanto no NS2 todos os nós são criados no tempo zero da simulação, o SUMO permite que os veículos sejam criados durante a simulação. Além disso, no SUMO, quando um veículo completa sua rota, ele é automaticamente removido da simulação. Dessa forma, durante uma simulação no NS2 o número de nós é constante, enquanto no SUMO esse número é variável. Nas várias simulações realizadas no SUMO, percebemos de uma forma geral que durante a simulação sempre havia no mínimo 50% do total de veículos trafegando.

Como o NS2 não permite que nós sejam criados ou removidos durante a simulação, os nós que começaram a trafegar no tempo diferente de zero são implementados no NS2 como veículos parados, que só passam a se mover no tempo especificado pelo SUMO. Além disso, quando um veículo atinge seu destino, ao invés de ser removido da simulação, ele permanece parado na posição do destino até o fim da simulação. Entretanto, apesar de estarem parados esses nós participam da simulação enviando e recebendo resposta. Dessa forma, esse comportamento pode influenciar negativamente o resultado das simulações, visto que estaríamos simulando um cenário com menor mobilidade devido aos inúmeros nós parados. Por essa razão, uma adaptação do código do NS2 foi necessária.

O objetivo da adaptação é evitar que os veículos que estão parados aguardando para iniciar sua movimentação e os veículos que estão parados por terem alcançado o final de sua rota participem da transmissão de mensagens influenciando assim o resultado da simulação. Para isso, antes de realizarmos a simulação dos protocolos escolhidos, sempre realizamos uma simulação sem trocas de mensagens apenas para que os veículos salvem sua posição em cada tempo de simulação em um arquivo de texto. Utilizando esses arquivos durante a simulação dos protocolos cada veículo sabe qual será sua posição exata em qualquer instante da simulação e, a partir desse conhecimento, adequamos o comportamento dos veículos da seguinte forma:

- **Veículos aguardando para iniciar sua movimentação:** No início da simulação todos os veículos são movidos para uma posição distante das vias (diferente da posição inicial do veículo indicada no arquivo salvo previamente) para garantir que eles não vão se comunicar com os veículos em movimento. Uma vez posicionados, os veículos passam a verificar qual será sua posição após um segundo de simulação. Se esta posição for igual a inicial, ele permanecerá afastado do mapa. Caso contrário, é sinal que o veículo irá começar a se movimentar, então movemos ele para a posição inicial indicada no arquivo.

O Algoritmo 5.1 mostra mais claramente a idéia da adaptação.

- **Veículos que já alcançaram seu destino:** Ao alcançar o seu destino, o veículo deve ser afastado do mapa para garantir que ele não participará da transmissão de mensagens. Para descobrir se um veículo chegou ao seu destino, o veículo verifica se a sua posição no próximo instante de simulação é igual a posição indicada como final do arquivo de posições. Se essas posições forem iguais, o veículo é afastado do mapa, caso contrário nada é feito. O Algoritmo 5.2 mostra mais claramente a idéia da adaptação.

Algoritmo 5.1: Algoritmo para corrigir o comportamento dos veículos que não iniciam a sua movimentação no começo da simulação.

Data:

V : Conjunto contendo todos os veículos da simulação

$PosAfastada$: Posição afastada do mapa

$P[i][t]$: Matriz com a posição de cada veículo i no tempo de simulação t

T : Tempo de simulação

```
1 foreach  $v \in V$  do
2   |  $v.posicao \leftarrow PosAfastada$ ;
3 end
4 while  $t < T$  do
5   | foreach  $v \in V$  do
6     | if  $P[v][t+1] \neq P[v][t]$  then
7       | |  $v.posicao \leftarrow P[v][t]$ ;
8       | end
9     | end
10  |  $t \leftarrow t + 1$ ;
11 end
```

Para nossos experimentos, consideramos as aplicações dos nós como geradoras de dados CBR transmitidos em intervalos constantes de tempo. Os valores apresentados nos gráficos da Seção 5.5 são valores médios de 30 amostras obtidas por meio de repetições das simulações. Todos os gráficos são apresentados com intervalo de confiança de 95%.

5.5 Resultados

Neste trabalho, é analisado o impacto de três condições diferentes de rede sobre o desempenho dos protocolos simulados:

Algoritmo 5.2: Algoritmo para corrigir o comportamento dos veículos que já alcançaram o seu destino.

Data:

V : Conjunto contendo todos os veículos da simulação

$PosAfastada$: Posição afastada do mapa

$P[i][t]$: Matriz com a posição de cada veículo i no tempo de simulação t

T : Tempo de simulação

```
1 while  $t < T$  do
2   foreach  $v \in V$  do
3     if  $P[v][t + 1] = P[v][T]$  then
4        $v.posicao \leftarrow PosAfastada$ ;
5     end
6   end
7    $t \leftarrow t + 1$ ;
8 end
```

- *Densidade veicular* - Variação do número de veículos;
- *Carga da rede* - Variação do número de veículos fonte;
- *Mobilidade* - Variação do cenário.

Como mencionado na Seção 5.2, a densidade de veículos exerce forte influência no comportamento de uma rede veicular. A variação da densidade influencia diretamente no grau de dinamicidade da rede, na mobilidade dos nós e, conseqüentemente, na conectividade da rede. Além disso, nós podemos observar no mundo real que a densidade de veículos varia de acordo com outros aspectos como horário ou ocorrência de acidente, por exemplo. Tais características são suficientes para justificar a análise dessa condição em relação ao desempenho dos protocolos. Para analisarmos tal condição variamos o parâmetro quantidade de veículos nas simulações.

Outra condição analisada neste trabalho é a carga da rede, que está relacionada com a quantidade de tráfego que a rede consegue transmitir de maneira satisfatória. O aumento demasiado da carga por gerar sobrecarga da rede e conseqüentemente, degradação do desempenho da mesma. Nos cenários utilizados, nós definimos o intervalo de tempo entre o envio de cada mensagem e esse intervalo é fixo durante toda simulação e utilizado por todos os nós fontes. Desta forma, ao adicionarmos um nó fonte estamos também aumentando o conseqüentemente o número de mensagens trafegadas na rede, influenciando assim a carga da rede. Como nas redes veiculares o número de veículos fontes utilizando uma aplicação de rede veicular pode variar ao longo do tempo e, além disso, mesmo que a porcentagem de veículos fonte se

mantenha constante, uma variação na densidade pode resultar em uma mudança na carga da rede. Julgamos importante nós analisamos a carga da rede em relação ao aumento do número de veículos fontes.

Para avaliar o desempenho dos protocolos no cenário urbano e de rodovia, é analisada a condição mobilidade. No entanto, diferentemente da densidade e da carga da rede, a variação da mobilidade não é um parâmetro de simulação. Para avaliar tal condição é necessário trocar o cenário da simulação, realizando simulações com mapas de cenário urbano e mapas de cenário de rodovia.

Para avaliar as condições representadas pelos parâmetros de simulação, varia-se o parâmetro correspondente à condição que se deseja analisar e mantém-se os demais parâmetros de simulação fixos em seus valores padrão, representados pelos valores entre colchetes nas Tabelas 5.3 e 5.4.

As métricas analisadas para cada cenário e protocolo são:

- *Pacotes de controle* - Correspondem à contabilização do número médio de pacotes de controle utilizado para manter o funcionamento da rede;
- *Taxa de entrega* - Corresponde à razão média entre o número de dados entregues ao destino com relação ao número de dados que são enviados pelos nós de origem;
- *Atraso fim a fim* - Corresponde ao tempo médio necessário para um pacote ser transmitido através da rede da origem até o destino.

5.5.1 Pacotes de Controle

Os pacotes de controle, apesar de indispensáveis para manter o correto funcionamento da rede, são os principais responsáveis pela sobrecarga da rede. À medida que a quantidade de pacotes de controle enviados cresce, as chances da rede ficar congestionada aumentam consideravelmente e, conseqüentemente, as perdas de pacotes passam a ser mais frequentes. Entretanto, a sobrecarga da rede pode ser amenizada se o protocolo de roteamento utilizar algum mecanismo para controlar o envio e/ou propagação desses pacotes.

Conforme pode ser visto nas Figuras 5.3(a), 5.3(b) e 5.3(c), o DSR foi o protocolo que mais enviou pacotes de controle no cenário urbano. Ao comparar o desempenho do DSR com o AODV pode-se observar que o AODV envia menos pacotes de controle. Isso se deve aos diferentes mecanismos de roteamento utilizados por eles. Como o DSR realiza o roteamento baseado na origem, quando um enlace quebra, a

não existência de um caminho alternativo no *cache* faz com que um novo procedimento de descoberta de rota seja executado pelo nó de origem. Por outro lado, no AODV qualquer nó pode obter rotas novas para o destino, logo, quando um enlace quebra, um nó intermediário pode iniciar o procedimento de rota, diminuindo assim o número de mensagens de controle para restabelecer o caminho quebrado.

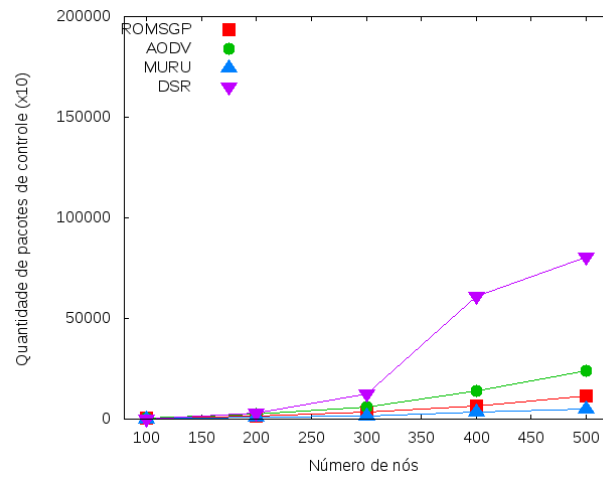
Devido à topologia mais simples do cenário de rodovia (sem cruzamentos, semáforos, etc.), os veículos também apresentam um modelo de mobilidade mais simples, onde mudanças repentinas de direção não acontecem. Por essa razão, o aumento da densidade de veículos afeta de maneira mais suave o envio de pacotes de controle, como pode-se observar nas Figuras 5.4(a), 5.4(b) e 5.4(c).

Nós podemos observar no cenário de rodovia que quando a rede é esparsa, o desempenho dos protocolos ROMSGP e MURU é semelhante. Além disso, a diferença entre o número de pacotes enviados é bem menor se comparada com uma rede nas mesmas condições no cenário urbano. Isso ocorre devido ao padrão de mobilidade do cenário de rodovia somado às características dos mecanismos de controle de sobrecarga utilizados pelos protocolos. No cenário de rodovia em uma rede esparsa, o mecanismo utilizado pelo MURU (baseado na área de *broadcast*) se torna menos restritivo que o utilizado pelo ROMSGP, já que alguns caminhos formados por nós que estão se movimentando no sentido contrário ao movimento do nó fonte serão propagados devido à proximidade das vias, enquanto no ROMSGP apenas caminhos compostos por nós que se movimentam no mesmo sentido serão propagados. Entretanto, quando a densidade da rede aumenta, a área de *broadcast* passa a ser mais restritiva que o agrupamento de veículos realizado pelo ROMSGP, já que devido ao aumento do número de veículos, o número de caminhos de ambos os sentidos também aumenta. Assim, como a única restrição imposta pelo ROMSGP para utilizar um caminho é que os nós que o compõe estejam se movimentando na mesma direção, boa parte dos novos caminhos poderão ser utilizados.

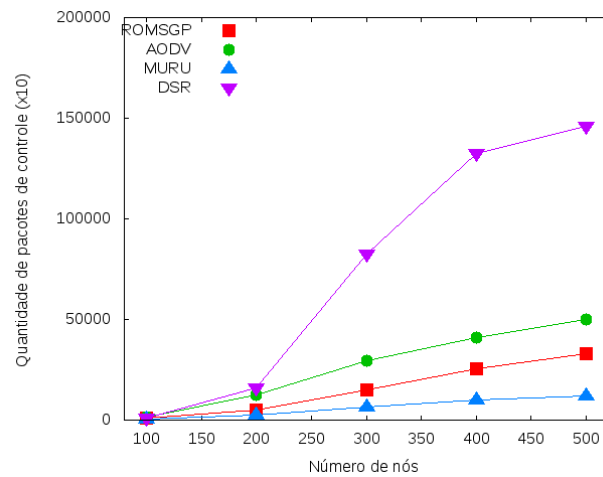
A Figura 5.5 apresenta a quantidade de pacotes de controle de acordo com o tipo de pacote de controle (RERR, RREP e RREQ) em função do cenário e para cada protocolo de roteamento. No cenário de rodovia, mais mensagens de *reply* são enviadas, logo mais caminhos são estabelecidos. Contudo, devido ao elevado número de mensagens de erro, pode-se concluir que grande parte desses caminhos quebram durante a transmissão das mensagens de dados. Além disso, podemos verificar que em redes esparsas a mudança de cenário é uma característica determinante para o desempenho dos mecanismos de controle de sobrecarga do ROMSGP e MURU. Enquanto no cenário urbano o MURU envia menos pacotes de controle, no cenário

de rodovia o ROMSGP é que envia menos pacotes de controle.

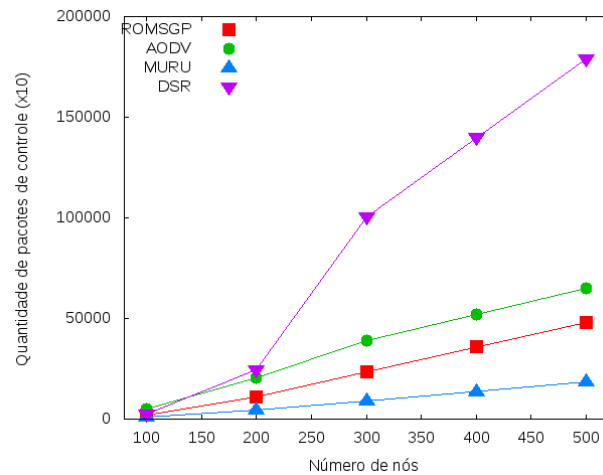
Em relação à sobrecarga da rede, os protocolos desenvolvidos para redes veiculares obtiveram melhor desempenho em ambos os cenários, devido aos mecanismos de controle de carga da rede implementados por eles, já que ao utilizar parâmetros de mobilidade eles conseguem evitar o envio desnecessário de mensagens de pacotes de controle, principalmente quando a rede é muito densa.



(a) 10% de nós fonte

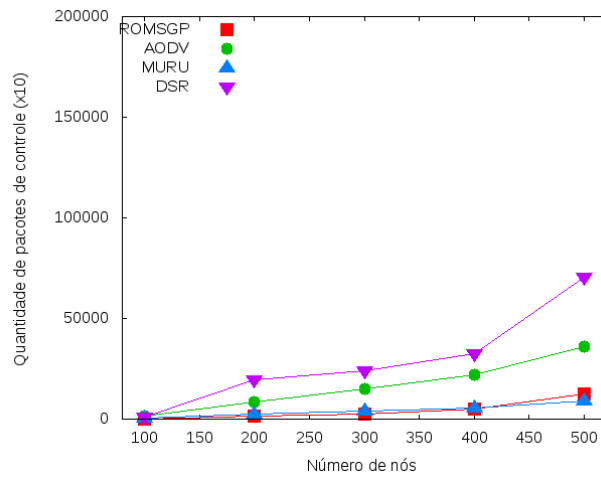


(b) 30% de nós fonte

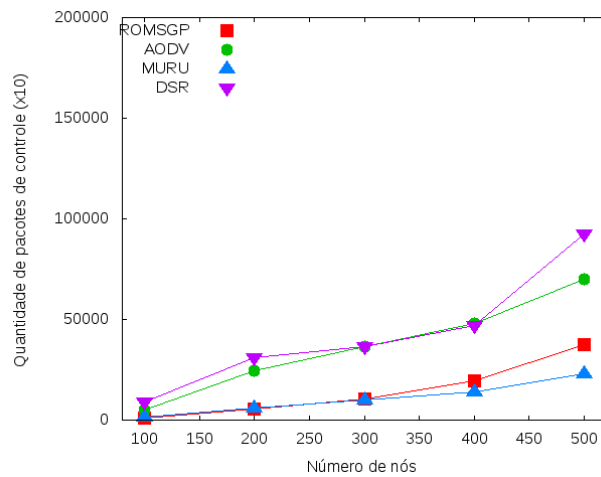


(c) 50% de nós fonte

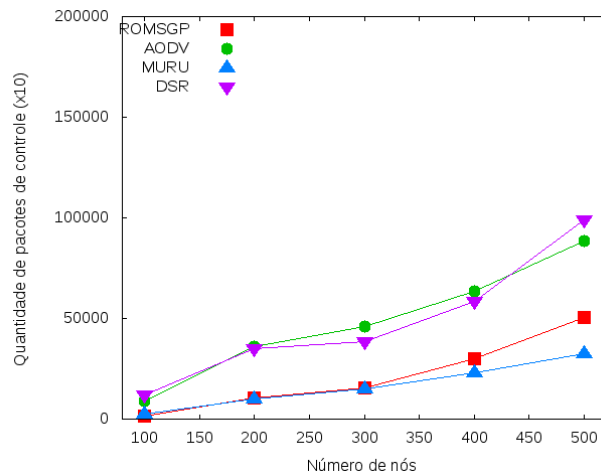
Figura 5.3: Quantidade de pacotes de controle enviados por cada protocolo de roteamento em função da densidade de veículos no cenário urbano.



(a) 10% de nós fonte



(b) 30% de nós fonte



(c) 50% de nós fonte

Figura 5.4: Quantidade de pacotes de controle enviados por cada protocolo de roteamento em função da densidade de veículos no cenário de rodovia.

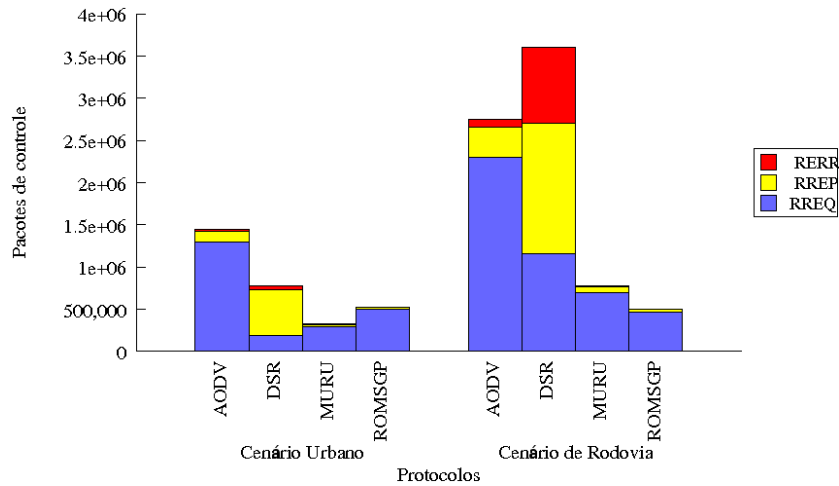


Figura 5.5: Quantidade de pacotes de controle enviados em função do tipo de pacote de controle, do cenário e do protocolo de roteamento. Rede composta por 100 veículos e 50% de nós fonte.

Conforme podemos verificar nas Tabelas 5.5, 5.6 e 5.7, no cenário urbano o protocolo que mais sofre com o problema de sobrecarga da rede é o DSR, enviando consideravelmente mais pacotes de controle. Já o MURU é o protocolo que menos envia mensagens de controle no cenário urbano, enviando poucas mensagens mesmo quando comparado com o segundo melhor protocolo, o ROMSGP. As tabelas mostram ainda que, assim como no cenário urbano, o protocolo que mais sofre com de sobrecarga da rede no cenário de rodovia é o DSR. Em relação ao melhor protocolo, o MURU mostrou-se melhor que o ROMSGP novamente, entretanto nós podemos notar que no cenário de rodovia ambos obtiveram desempenho semelhante, sobretudo quando aumentamos o número de veículos fonte.

Para melhor entender o impacto da carga da rede no desempenho dos protocolos foram realizadas simulações variando o número de veículos fonte presente nos cenários. A quantidade de veículos fonte foi variada de 10% a 60% do total de veículos.

A Figura 5.6 demonstra o impacto do aumento do número de nós fonte na quantidade de pacotes de controle necessária para manter a rede em funcionamento. Quando a carga da rede aumenta, o número de pacotes de controle enviados aumenta. Isso ocorre devido ao maior número de pacotes de dados enviados. Como os quatro protocolos simulados utilizam a estratégia reativa, é natural que à medida que o número de fontes aumente, a quantidade de pacotes de controle enviados cresça também.

5.5. RESULTADOS

Protocolo	Total de pacotes de controle enviados no cenário urbano	Total de pacotes de controle enviados no cenário de rodovia
DSR	1.575.149	1.481.235
AODV	466.451	832.853
ROMSGP	231.700	217.880
MURU	115.102	214.854

Tabela 5.5: Comparação do número de pacotes de controle enviados no cenário urbano e de rodovia com 10% de nós fonte.

Protocolo	Total de pacotes de controle enviados no cenário urbano	Total de pacotes de controle enviados no cenário de rodovia
DSR	3.786.575	2.161.043
AODV	1.342.370	1.842.166
ROMSGP	795.834	737.902
MURU	313.283	549.517

Tabela 5.6: Comparação do número de pacotes de controle enviados no cenário urbano e de rodovia com 30% de nós fonte.

Protocolo	Total de pacotes de controle enviados no cenário urbano	Total de pacotes de controle enviados no cenário de rodovia
DSR	3.066.730	2.431.262
AODV	1.290.881	2.430.518
ROMSGP	843.061	1.084.220
MURU	332.162	830.425

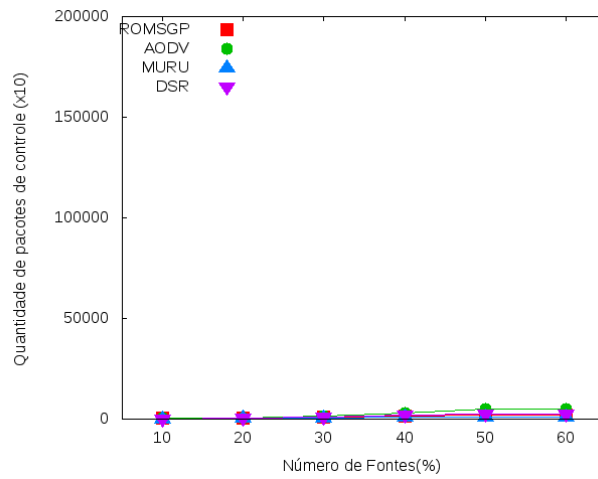
Tabela 5.7: Comparação do número de pacotes de controle enviados no cenário urbano e de rodovia com 50% de nós fonte.

A Figura 5.6(a) mostra o desempenho dos protocolos em uma rede com 100 veículos. Como a rede representada nesse cenário é esparsa, os protocolos sofrem com a escassez de caminhos para a realização do roteamento. Por essa razão, várias mensagens de requisição de rotas são enviadas pelos protocolos, em especial o AODV, o que resulta na maior quantidade de envio de pacotes de controle. O mesmo problema não ocorre com o ROMSGP e o MURU devido ao mecanismo de controle de sobrecarga utilizado por eles, que limita o encaminhamento de mensagens de requisição de rotas de acordo com os critérios mencionados na Capítulo 3. Apesar do protocolo DSR não ser eficiente em cenários com alta mobilidade, nesse cenário ele se sobressaiu em relação ao AODV devido ao mecanismo de *cache* utilizado por ele. Ainda assim, o DSR é o protocolo que mais envia mensagens de erro de rota.

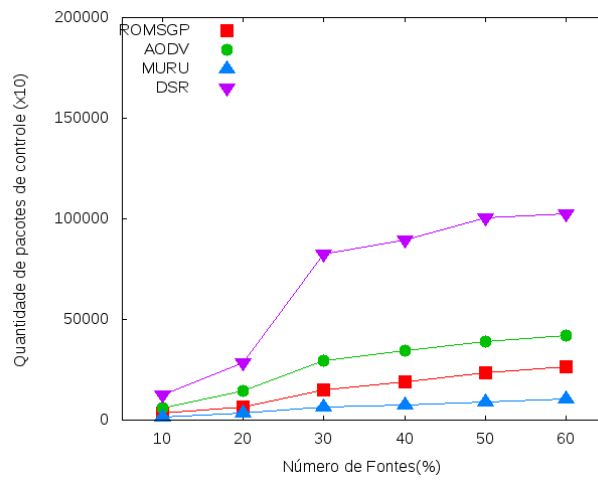
As Figuras 5.6(b) e 5.6(c) demonstram comportamentos similares dos protocolos simulados, ou seja, à medida que o número de fontes aumenta, os protocolos sobrecarregam mais a rede. Conforme dito anteriormente, os protocolos ROMSGP e MURU sofrem menos com o aumento da carga da rede graças aos mecanismos de controle que utilizam. Nesse contexto, devido à dinamicidade da rede e ao maior número de caminhos existentes, o DSR foi o protocolo que mais sobrecarregou a rede.

Em relação aos resultados obtidos na simulação dos cenários de rodovia (Figuras 5.7(a), 5.7(b) e 5.7(c)), pode-se observar um comportamento distinto dos protocolos AODV e DSR se compararmos aos resultados alcançados no cenário urbano. Em relação ao desempenho do DSR no cenário de rodovia, nós podemos observar que o aumento da carga da rede não resulta em um crescimento acentuado do número de pacotes de controles enviados, mantendo-se praticamente constante. Isso ocorre porque no cenário de rodovia o DSR consegue utilizar de maneira mais eficiente os caminhos alternativos armazenados em *cache*. Por essa razão, quando a carga da rede é grande, o AODV é o protocolo que mais envia pacotes de controle.

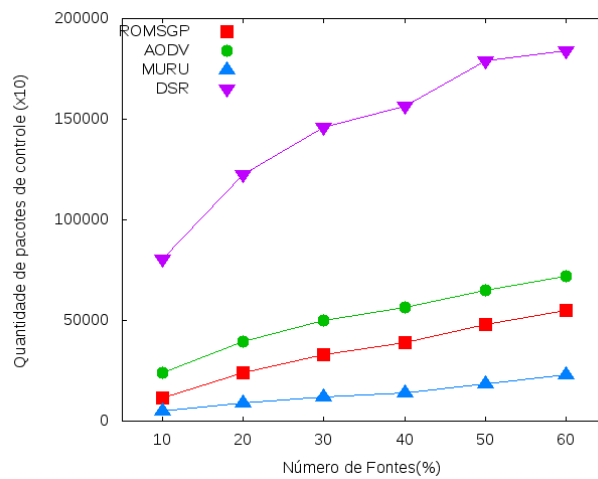
Conforme podemos verificar na Tabela 5.8, quando a rede é esparsa no cenário urbano, o protocolo que mais sofre com a sobrecarga da rede é o protocolo AODV e o protocolo que sofre menos é o protocolo MURU. Já no cenário de rodovia o protocolo DSR é o que mais envia pacotes de controle, por outro lado, o protocolo ROMSGP apresenta o melhor desempenho nesse cenário. As Tabelas 5.9 e 5.10 mostram comportamentos similares. Nelas nós podemos verificar que o protocolo DSR é o que mais sofre com sobrecarga independentemente do cenário onde ele é aplicado. Já o protocolo MURU apresenta o melhor desempenho em ambos cenários.



(a) 100 veículos

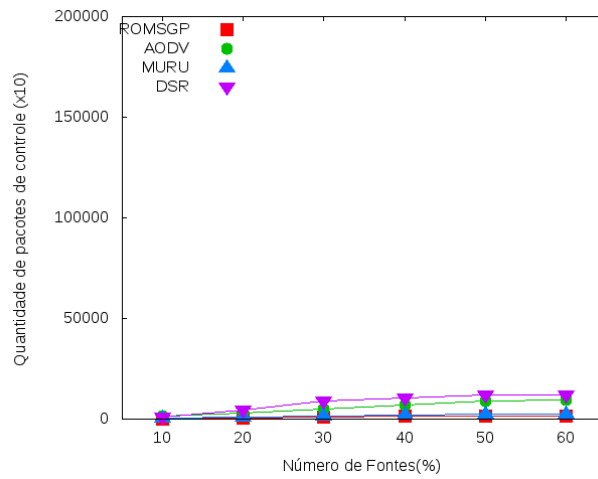


(b) 300 veículos

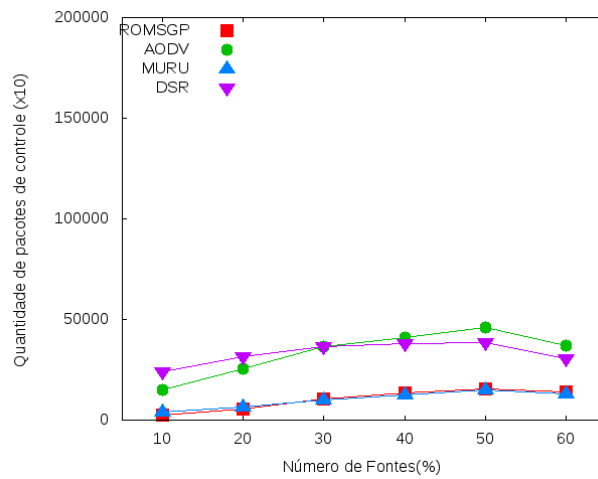


(c) 500 veículos

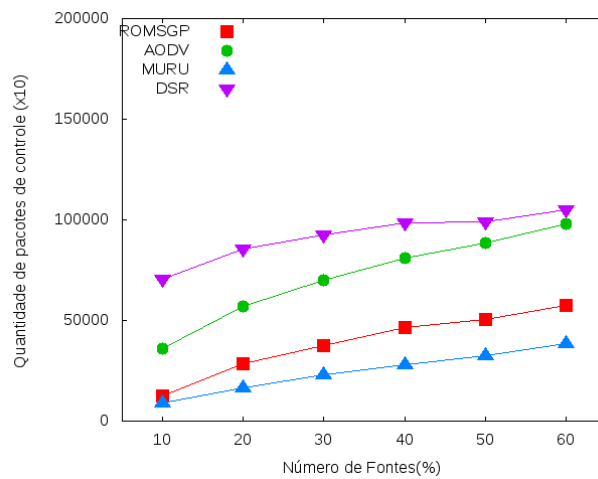
Figura 5.6: Quantidade de pacotes de controle enviados por cada protocolo de roteamento em função do número de fontes no cenário urbano.



(a) 100 veículos



(b) 300 veículos



(c) 500 veículos

Figura 5.7: Quantidade de pacotes de controle enviados por cada protocolo de roteamento em função do número de fontes no cenário rodovia.

Protocolo	Total de pacotes de controle enviados no cenário urbano	Total de pacotes de controle enviados no cenário de rodovia
DSR	87.724	487.335
AODV	152.540	350.385
ROMSGP	67.390	63.047
MURU	40.715	100.587

Tabela 5.8: Comparação do número de pacotes de controle enviados no cenário urbano e de rodovia com 100 veículos.

Protocolo	Total de pacotes de controle enviados no cenário urbano	Total de pacotes de controle enviados no cenário de rodovia
DSR	4.159.366	1.992.129
AODV	1.655.840	2.012.804
ROMSGP	936.851	617.752
MURU	383.959	603.318

Tabela 5.9: Comparação do número de pacotes de controle enviados no cenário urbano e de rodovia com 300 veículos.

Protocolo	Total de pacotes de controle enviados no cenário urbano	Total de pacotes de controle enviados no cenário de rodovia
DSR	8.685.106	5.571.617
AODV	3.068.838	4.304.032
ROMSGP	2.104.463	2.332.085
MURU	815.180	1.480.766

Tabela 5.10: Comparação do número de pacotes de controle enviados no cenário urbano e de rodovia com 500 veículos.

5.5.2 Taxa de Entrega

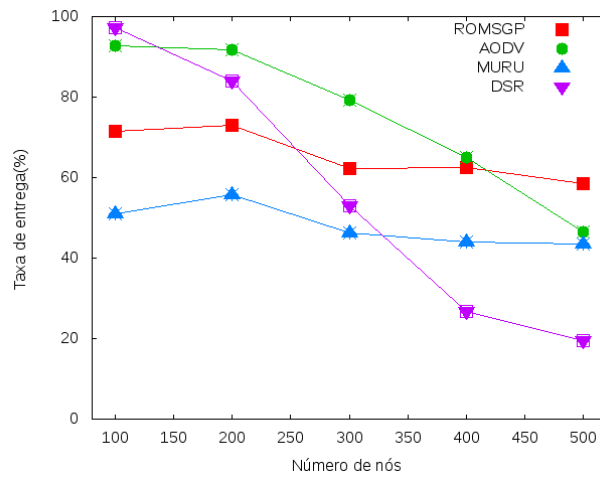
A Figura 5.8 demonstra o impacto da densidade da rede na taxa de entrega para os cenários urbano e de rodovia.

No cenário urbano, o aumento da densidade afeta a taxa de entrega de duas formas distintas (Figuras 5.8(a), 5.8(b), e 5.8(c)). Em redes esparsas, o aumento da densidade determina uma maior quantidade de caminhos possíveis de serem utilizados no roteamento, o que conseqüentemente resulta em taxas de entrega melhores. Contudo, quando a rede torna-se muito densa a taxa de entrega passa a ser prejudicada e, a partir desse ponto, o aumento da densidade passa a afetar de forma negativa a taxa de entrega.

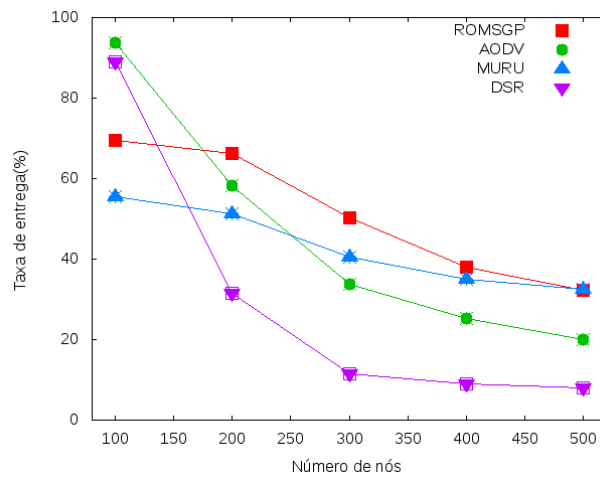
Nós podemos notar que o comportamento da taxa de entrega não é determinado apenas pela densidade da rede, mas também pela quantidade de nós fontes. Nesse caso, quanto maior a quantidade de nós fonte, maior o número de pacotes de controle necessário para manter a rede funcionando. Contudo, à medida que a carga da rede aumenta, perdas de pacotes passam a ser mais frequentes, degradando assim a taxa de entrega.

Nas Figuras 5.8(a) e 5.9(a) a carga da rede é pequena (10% de nós fonte). Por essa razão, os protocolos propostos para MANETs, AODV e DSR, apresentam-se mais eficientes quando a densidade é baixa, enquanto o MURU e ROMSGP sofrem para entregar os pacotes devido ao mecanismo implementado por eles para evitar a sobrecarga da rede, que é responsável por filtrar os caminhos existentes elegendo os que podem ser utilizados.

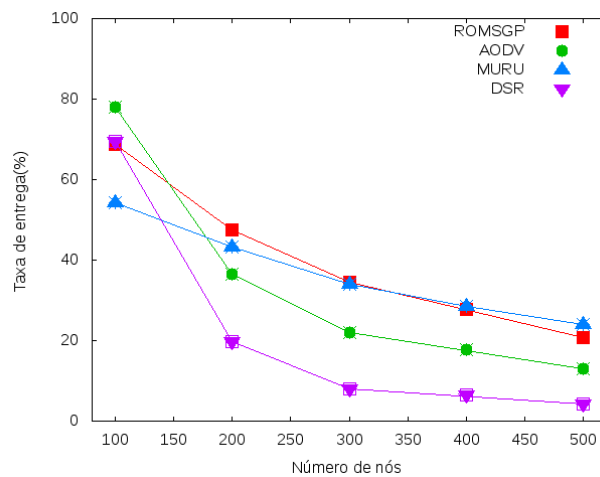
À medida que a rede se torna mais densa, os protocolos passam a sofrer mais com a sobrecarga da rede. Contudo, os protocolos MURU e ROMSGP conseguem lidar melhor com esse problema, amenizando assim o impacto sobre a taxa de entrega. Já os protocolos DSR e AODV têm seus desempenhos bastantes afetados pelo envio excessivo de pacotes de controle, podendo ser observada uma queda acentuada da taxa de entrega. Comparando a melhor taxa de entrega alcançada pelos protocolos com a taxa atingida com a rede mais densa, pode-se perceber de maneira mais clara o quão eficientes são os protocolos de roteamento para redes veiculares.



(a) 10% de nós fonte

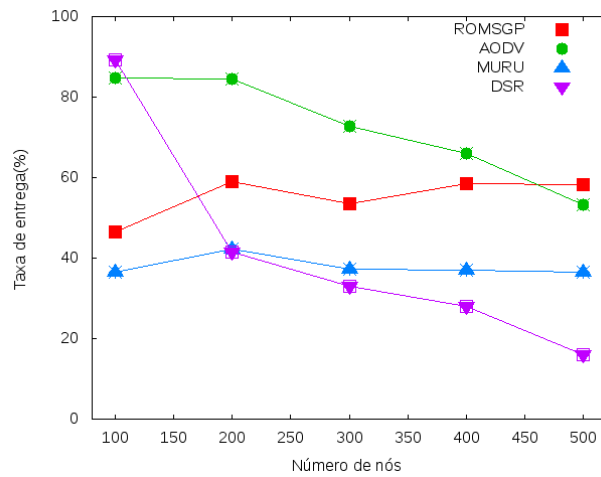


(b) 30% de nós fonte

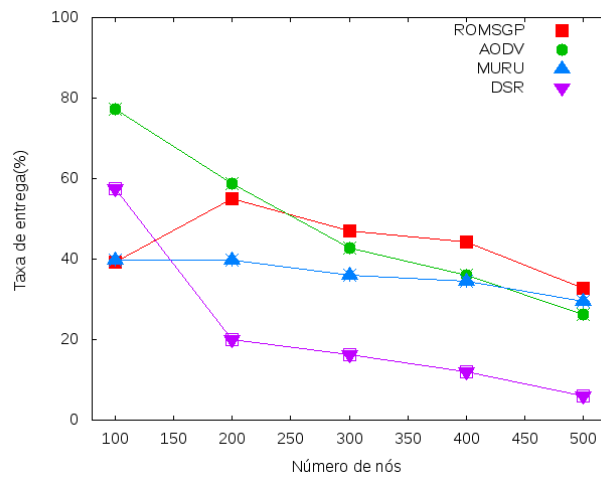


(c) 50% de nós fonte

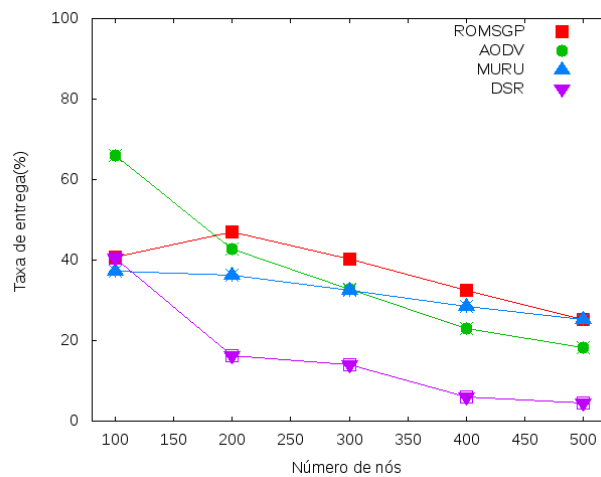
Figura 5.8: Taxa de entrega para cada protocolo de roteamento em função da densidade de veículos no cenário urbano.



(a) 10% de nós fonte



(b) 30% de nós fonte



(c) 50% de nós fonte

Figura 5.9: Taxa de entrega para cada protocolo de roteamento em função da densidade de veículos no cenário de rodovia.

As Tabelas 5.11 e 5.12 mostram que os protocolos MURU e ROMSGP lidam melhor com o aumento da carga da rede obtendo a menor variação da taxa de entrega nas condições extremas em ambos os cenários. No cenário urbano, a variação medida da taxa de entrega dos protocolos MURU e ROMSGP foi de 10% e no cenário de rodovia foi de 5% para o MURU e 15% para o ROMSGP. Além disso, no cenário urbano esses protocolos atingiram uma maior taxa de entrega quando comparados com os resultados obtidos no cenário de rodovia. Esse resultado era esperado, já que os protocolos são específicos para o cenário urbano.

Apesar do DSR e do AODV sofrerem as maiores variações da taxa de entrega em ambos os cenários, esses protocolos alcançaram a melhor taxa de entrega. No cenário urbano, o DSR entregou 95% dos pacotes enquanto o AODV entregou 90%. No cenário de rodovia, o DSR entregou cerca de 90% dos pacotes, enquanto o AODV conseguiu entregar cerca de 85%. No entanto, quando a densidade da rede é máxima, o ROMSGP torna-se o protocolo mais eficiente, seguido respectivamente pelo AODV, MURU e DSR.

As Figuras 5.8(b) e 5.9(b) mostram o desempenho dos protocolos em uma rede com 30% de nós fonte. Uma maior quantidade de nós gerando mensagens só acelera o processo observado no cenário anterior: a degradação da taxa de entrega devido ao aumento da densidade e da carga da rede. Como pode ser visto, quando a densidade da rede é baixa os protocolos para MANETs são mais eficientes pelas mesmas razões abordadas anteriormente. Contudo, quando a densidade passa a ser de duzentos veículos, podemos observar no cenário urbano um comportamento diferente em relação ao cenário anterior: o protocolo que alcança a melhor taxa de entrega é o ROMSGP e não o AODV, devido à sobrecarga da rede gerada pelo pacotes de controle enviados.

Por sua vez, no cenário de rodovia, o protocolo ROMSGP passar a ser o mais eficiente após a densidade veicular ultrapassar trezentos veículos, já que no cenário de rodovia o aumento da densidade afeta de maneira mais sutil o envio de pacotes de controle e, conseqüentemente, a sobrecarga da rede.

5.5. RESULTADOS

Protocolo	Melhor taxa de entrega alcançada	Taxa de entrega alcançada com densidade máxima da rede	Variação das taxas alcançadas em condições extremas
DSR	95%	20%	75%
AODV	90%	47%	43%
MURU	55%	45%	10%
ROMSGP	70%	60%	10%

Tabela 5.11: Comparação das taxas de entrega alcançadas em situações extremas da rede com 10% de nós fonte no cenário urbano.

Protocolo	Melhor taxa de entrega alcançada	Taxa de entrega alcançada com densidade máxima da rede	Variação das taxas alcançadas em condições extremas
DSR	90%	15%	75%
AODV	85%	55%	30%
MURU	40%	35%	5%
ROMSGP	60%	60%	15%

Tabela 5.12: Comparação das taxas de entrega alcançadas em situações extremas da rede com 10% de nós fonte no cenário de rodovia.

As Tabelas 5.13 e 5.14 mostram novamente que o DSR é o protocolo que mais sofre com o aumento da densidade e carga da rede. Por outro lado, o MURU é novamente o protocolo que apresentou a menor variação da taxa de entrega: 20% no cenário urbano e 10% no cenário de rodovia.

Protocolo	Melhor taxa de entrega alcançada	Taxa de entrega alcançada com densidade máxima da rede	Variação das taxas alcançadas em condições extremas
DSR	90%	10%	80%
AODV	95%	20%	75%
MURU	55%	35%	20%
ROMSGP	70%	35%	35%

Tabela 5.13: Comparação das taxas de entrega alcançadas em situações extremas da rede com 30% de nós fonte no cenário urbano.

No cenário de rodovia, o AODV foi o protocolo que alcançou a maior taxa de entrega, entregando 77% quando a rede possuía cem veículos. No cenário urbano, o AODV também foi o protocolo que alcançou a melhor taxa de entrega, entretanto,

Protocolo	Melhor taxa de entrega alcançada	Taxa de entrega alcançada com densidade máxima da rede	Variação das taxas alcançadas em condições extremas
DSR	57%	5%	52%
AODV	77%	27%	50%
MURU	40%	30%	10%
ROMSGP	55%	35%	20%

Tabela 5.14: Comparação das taxas de entrega alcançadas em situações extremas da rede com 30% de nós fonte no cenário de rodovia.

com o aumento da densidade ele teve seu desempenho rapidamente degradado. Comparando o desempenho do ROMSGP nos cenários simulados, nós podemos perceber que no cenário de rodovia o seu desempenho diminui suavemente com o aumento da densidade devido ao menor impacto do aumento da densidade na quantidade de pacotes de controle enviados e, conseqüentemente, no aumento da sobrecarga da rede. Devido ao mecanismo de controle de sobrecarga implementado pelo MURU, este foi o protocolo menos afetado pelo aumento da densidade nos cenários simulados.

As Figuras 5.8(c) e 5.9(c) mostram o desempenho dos protocolos em uma rede com 50% de nós fonte nos cenários urbano e de rodovia. Devido à grande quantidade de nós fonte, com o aumento da densidade, a carga da rede aumenta rapidamente. No cenário urbano, quando a densidade da rede é baixa, pode ser observado o mesmo comportamento ocorrido nos cenários anteriores, ou seja, os protocolos AODV e DSR alcançam taxas de entrega superiores as alcançadas pelo MURU e ROMSGP. Com o aumento da densidade para duzentos veículos pode-se observar um comportamento diferente do ocorrido no cenário anterior, portanto, apesar do ROMSGP alcançar a melhor taxa de entrega nessas condições, o segundo melhor protocolo passa a ser o MURU ao invés do AODV.

Quando a densidade é baixa no cenário de rodovia, o protocolo AODV mostra-se mais eficiente que os outros protocolos, conseguindo aproveitar melhor os poucos caminhos existentes. Ao contrário do cenário urbano, o DSR não consegue entregar boa parte dos pacotes, mesmo quando a densidade é baixa, apesar de sobrecarregar menos a rede. Apesar de enviar praticamente a mesma quantidade de pacotes de controle que o AODV, o DSR tem desempenho bem inferior ao AODV devido à grande quantidade de caminhos quebrados durante o roteamento, fato comprovado na Figura 5.5, que mostra que a maior parte dos pacotes de controle enviados são mensagens de erro de rota. Assim como no cenário urbano, o protocolo MURU é o

mais eficiente quando a rede atinge a densidade máxima.

A Tabela 5.15 mostra mais uma vez que no cenário urbano o DSR e o MURU são os protocolos que sofrem mais e menos com o aumento da densidade, respectivamente. Em relação à maior taxa de entrega, essa foi alcançada pelo AODV quando a densidade da rede era de cem veículos. O protocolo desenvolvido para redes veiculares que alcançou a melhor taxa de entrega foi o ROMSGP, entregando 70% dos pacotes em uma rede com duzentos veículos. Com a densidade veicular máxima, o MURU foi o protocolo que obteve o melhor desempenho.

A Tabela 5.16 mostra que o protocolo que tem a maior variação da taxa de entrega no cenário de rodovia é o AODV. Com a densidade mínima da rede, ele alcança a maior taxa de entrega, entretanto, com o aumento da densidade seu desempenho cai consideravelmente. Mais uma vez o protocolo MURU apresentou uma baixa variação da taxa de entrega, juntamente com o ROMSGP. Além disso, estes dois protocolos mostram-se os mais eficientes quando a rede atinge a densidade máxima.

As Figuras 5.10 e 5.11 apresentam o impacto do aumento da carga na taxa de entrega dos nós, no cenário urbano e de rodovia. As Figuras 5.10(a) e 5.11(a) ilustram o desempenho dos protocolos simulados quando aplicados em uma rede esparsa, mais especificamente com cem nós. Como se trata de uma rede esparsa, ou seja, com poucos caminhos possíveis de serem utilizados no roteamento, os protocolos MURU e ROMSGP não superam os protocolos típicos de MANETs, pois eles implementam mecanismos para evitar a sobrecarga da rede que, por sua vez, acabam impedindo o roteamento através de caminhos que, apesar de não serem estáveis, permitem a entrega dos pacotes de dados.

Protocolo	Melhor taxa de entrega alcançada	Taxa de entrega alcançada com densidade máxima da rede	Variação das taxas alcançadas em condições extremas
DSR	70%	5%	65%
AODV	80%	15%	65%
MURU	55%	25%	30%
ROMSGP	70%	20%	50%

Tabela 5.15: Comparação das taxas de entrega alcançadas em situações extremas da rede com 50% de nós fonte no cenário urbano.

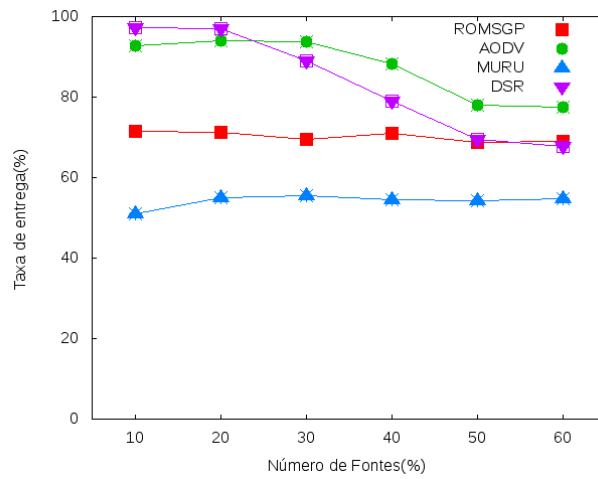
Perkins et al. [Perkins et al. 2001] demonstram através de simulações que o protocolo DSR é mais eficiente em redes que possuem baixa carga e/ou seus nós possuem baixa mobilidade. Já o AODV é mais eficiente em redes com maior carga

Protocolo	Melhor taxa de entrega alcançada	Taxa de entrega alcançada com densidade máxima da rede	Variação das taxas alcançadas em condições extremas
DSR	40%	5%	35%
AODV	65%	20%	45%
MURU	35%	25%	10%
ROMSGP	40%	25%	15%

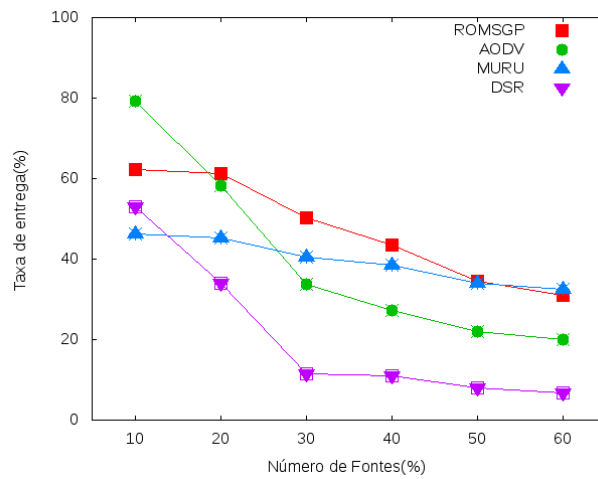
Tabela 5.16: Comparação das taxas de entrega alcançadas em situações extremas da rede com 50% de nós fonte no cenário de rodovia.

e maior mobilidade dos nós. A Figura 5.10(a) comprova exatamente esse comportamento. A princípio, quando a carga da rede é baixa, o protocolo DSR entrega mais pacotes que o AODV. Contudo, à medida que a carga da rede aumenta, o desempenho do DSR diminui, chegando ao ponto do AODV ultrapassar o DSR em relação à taxa de entrega. O mesmo comportamento pode ser observado na Figura 5.11(a).

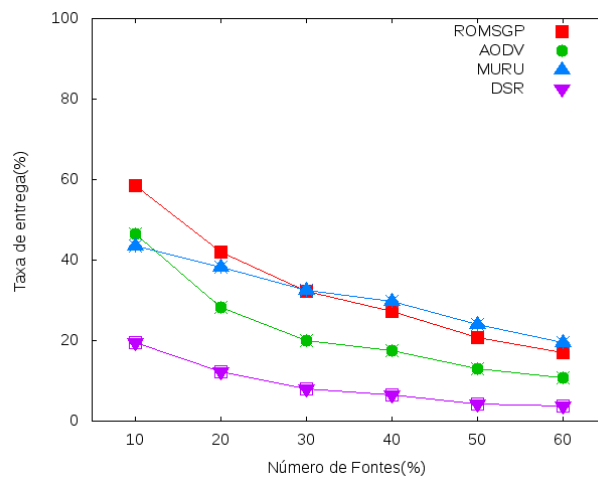
As Figuras 5.10(b), 5.11(b), 5.10(c) e 5.11(c) ilustram comportamentos semelhantes. Em todas elas, à medida que a carga da rede aumenta, a taxa de entrega dos protocolos diminui. No entanto, notam-se pequenas diferenças. Nas Figuras 5.10(b) e 5.11(b), quando a carga da rede é mínima, o AODV é o protocolo com a melhor taxa de entrega.



(a) 100 veículos

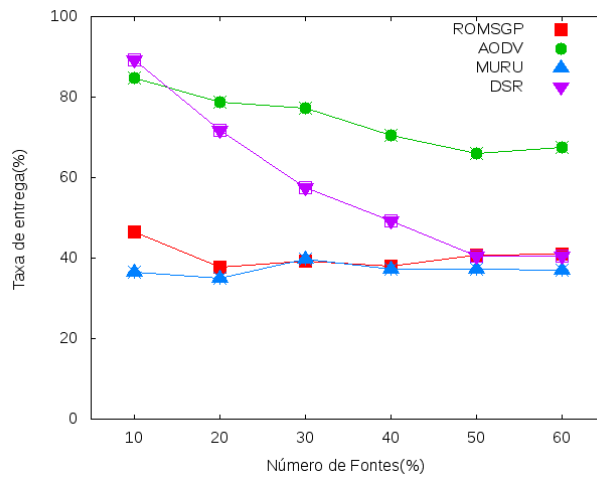


(b) 300 veículos

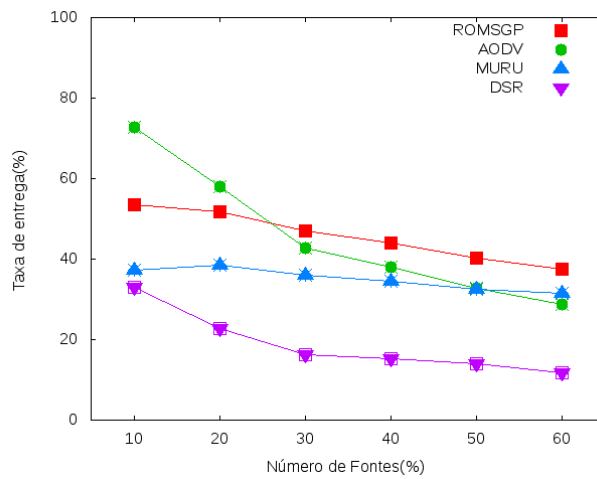


(c) 500 veículos

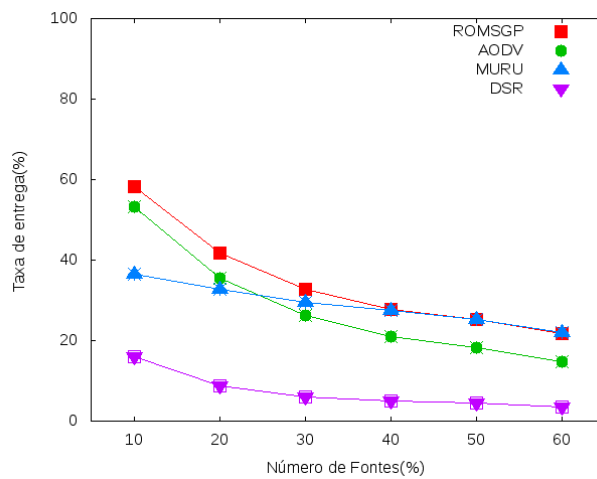
Figura 5.10: Taxa de entrega para cada protocolo de roteamento em função do número de fontes no cenário urbano.



(a) 100 veículos



(b) 300 veículos



(c) 500 veículos

Figura 5.11: Taxa de entrega para cada protocolo de roteamento em função do número de fontes no cenário de rodovia.

Com o aumento do número de nós fonte, mais pacotes de dados são enviados, por isso mais pacotes de controle são necessários para garantir a entrega dos dados, gerando, assim, uma sobrecarga da rede. Por essa razão, protocolos como o AODV e o DSR, que não implementam mecanismos de controle de sobrecargas eficientes, têm seus desempenhos mais afetados. Por outro lado, protocolos como o MURU e o ROMSGP, que implementam mecanismo de controle de sobrecarga, têm seus desempenhos afetados suavemente. Por essa razão, quando a carga da rede é máxima, os protocolos com melhores taxas de entrega são o MURU e o ROMSGP.

O aumento de veículos fonte resulta no crescimento da carga da rede, entretanto, em redes densas, esse crescimento ocorre de forma mais acentuada. Por essa razão, como podemos ver na Figura 5.10(c), quando a rede possui 20% ou mais veículos fonte, os protocolos MURU e ROMSGP se tornam mais eficientes, enquanto no cenário ilustrado na Figura 5.10(b) este fato só ocorre quando a porcentagem de fontes é de, pelo menos, 30%.

No cenário de rodovia esse mesmo comportamento pode ser observado na Figura 5.11(b). Contudo, devido a mobilidade dos nós nesse cenário e ao menor impacto do aumento de fontes na sobrecarga da rede, podemos perceber que os protocolos ROMSGP e MURU só se tornam mais eficientes quando o número de veículos fontes é de 50% do total de nós, enquanto no cenário urbano o mesmo fato pode ser observado com apenas 30% de nós fonte. A Figura 5.11(c) ilustra um comportamento semelhante. Contudo, um maior número de nós acentua ainda mais a queda da taxa de entrega. Nesse cenário, os protocolos MURU e ROMSGP se tornam os mais eficientes quando a rede tem cerca de 30% de veículos fonte, enquanto no cenário urbano o mesmo acontece com 20% de veículos fonte.

A Tabela 5.17 mostra o resumo dos resultados obtidos em relação à taxa de entrega no cenário urbano. Pode-se perceber que os protocolos para redes móveis *ad hoc* alcançam as melhores taxas de entrega, porém isso acontece apenas quando a rede é esparsa. Quando a rede atinge sua densidade máxima, nós podemos perceber que os protocolos para redes veiculares se sobressaem perante os protocolos desenvolvidos para redes móveis *ad hoc*. Em condições onde a sobrecarga da rede é alta devido ao aumento do número de veículos fonte, nós verificamos que o protocolo MURU tem o melhor desempenho dentre os protocolos simulados. Além disso, o protocolo MURU sempre alcança a menor variação das taxas de entrega.

Assim como na Tabela 5.17, nós podemos constatar através da Tabela 5.18 que no cenário de rodovia os protocolos que alcançaram as melhores taxas de entregas foram os protocolos para redes móveis *ad hoc*. Entretanto, diferentemente do observado

no cenário urbano, o protocolo AODV alcançou a melhor taxa de entrega mesmo quando a densidade da rede era máxima, em redes com 10% de nós fonte. Contudo, os protocolos de redes veiculares foram os que apresentaram a menor variação das taxas de entrega.

Condições	Cenário Urbano		
	10% de fontes	30% de fontes	50% de fontes
Melhor taxa de entrega	DSR	AODV	AODV
Melhor taxa de entrega com densidade máxima	ROMSGP	MURU e ROMSGP	MURU
Menor variação das taxas de entrega	MURU e ROMSGP	MURU	MURU

Tabela 5.17: Resumo dos resultados obtidos em relação à taxa de entrega no cenário urbano.

Condições	Cenário de Rodovia		
	10% de fontes	30% de fontes	50% de fontes
Melhor taxa de entrega	DSR	AODV	AODV
Melhor taxa de entrega com densidade máxima	ROMSGP	ROMSGP	MURU e ROMSGP
Menor variação das taxas de entrega	MURU	MURU	MURU

Tabela 5.18: Resumo dos resultados obtidos em relação à taxa de entrega no cenário de rodovia.

5.5.3 Atraso fim a fim

As Figuras 5.12 e 5.13 apresentam o impacto da densidade da rede sobre o atraso fim a fim dos pacotes nos cenários urbano e de rodovia. Conforme ilustrado nessa figura, o aumento do número de nós não é responsável por variações significativas no atraso. No cenário urbano a variação do atraso é de cerca de um segundo, independentemente da quantidade de veículos fonte. Nesse cenário, o protocolo que obteve o menor atraso foi o DSR devido ao uso dos caminhos armazenados em *cache*. Os outros protocolos obtiveram praticamente o mesmo atraso na entrega dos pacotes.

Conforme pode ser visto nas Figuras 5.13(a), 5.13(b) e 5.13(c), o DSR sempre obtém o maior atraso entre os protocolos simulados no cenário de rodovia. Isso se

deve ao fato da rede ser bastante dinâmica, logo boa parte dos caminhos armazenados pelo DSR em *cache* tornam-se inválidos rapidamente. Assim como no cenário urbano, os protocolos AODV, MURU e ROMSGP apresentam comportamentos semelhantes.

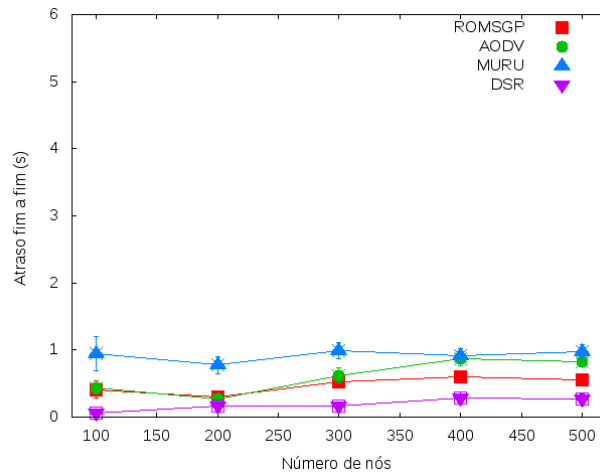
As Figuras 5.14 e 5.15 demonstram o impacto do aumento da carga da rede no atraso fim a fim. Como pode ser visto, o aumento da carga resultou em dois comportamentos distintos. Este fato está estritamente relacionado à densidade da rede.

A Figura 5.14(a) ilustra o atraso fim a fim medido em uma rede esparsa com cem veículos. Nessa rede, como os nós estão espalhados ao longo do mapa, a probabilidade de existirem caminhos de múltiplos saltos ligando a origem e o destino dos pacotes é pequena. Logo, a maioria dos pacotes entregues foram roteados através de caminhos de poucos saltos.

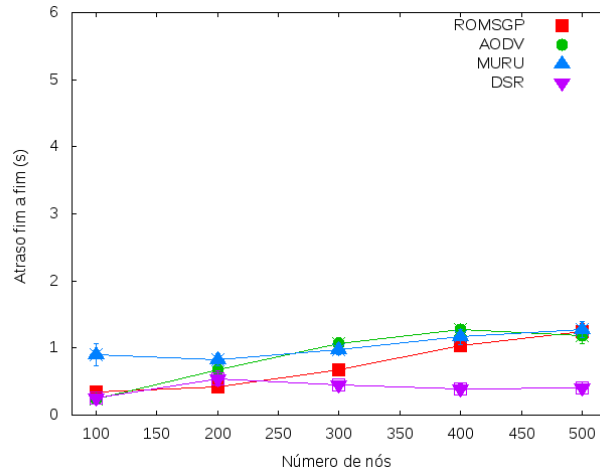
Com o aumento da carga da rede, mais veículos passam a originar pacotes de dados para novos destinos, com isso a probabilidade de existirem mais caminhos de poucos saltos ligando origem e destino torna-se maior. Por isso, à medida que a carga da rede aumenta, o atraso fim a fim diminui. Nesse contexto, o DSR foi o protocolo que obteve o menor atraso na entrega dos pacotes devido a utilização de caminhos armazenados em *cache*.

As Figuras 5.14(b) e 5.14(c) apresentam comportamentos similares para os protocolos simulados. Pode-se destacar que à medida que o número de veículos fonte aumenta, os protocolos sofrem com o aumento do atraso, com exceção do protocolo DSR que consegue tirar vantagens dos caminhos armazenados em *cache*. Entretanto, a variação de atraso observada nessas situações é menor do que um segundo.

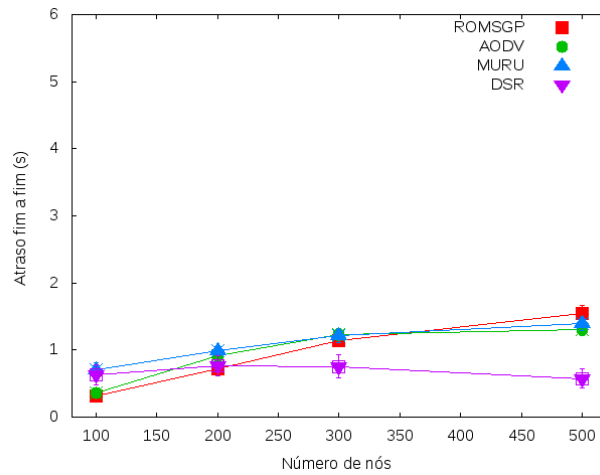
No cenário de rodovia podemos notar que o AODV, MURU e ROMSGP apresentam praticamente o mesmo desempenho independentemente da densidade, sendo a diferença do atraso medido entre os três protocolos menor que um segundo. Contudo, ao analisar o desempenho do DSR podemos perceber um comportamento diferente em relação ao observado no cenário urbano. Devido a dinâmica dos movimentos dos veículos no cenário de rodovia, o protocolo DSR não consegue utilizar de forma satisfatória os caminhos armazenados em *cache*. Por essa razão, o DSR obteve os maiores valores de atraso nessas situações.



(a) 10% de nós fonte

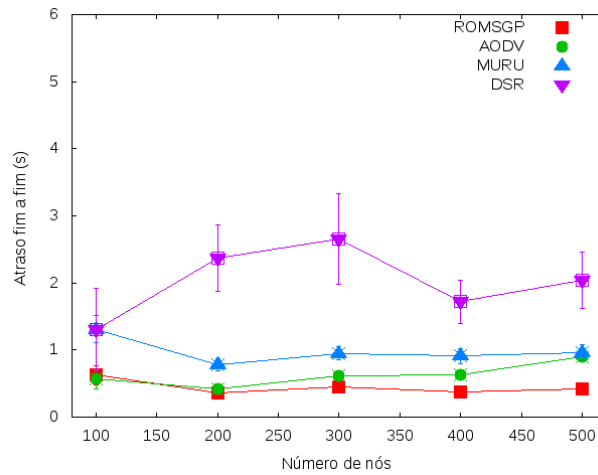


(b) 30% de nós fonte

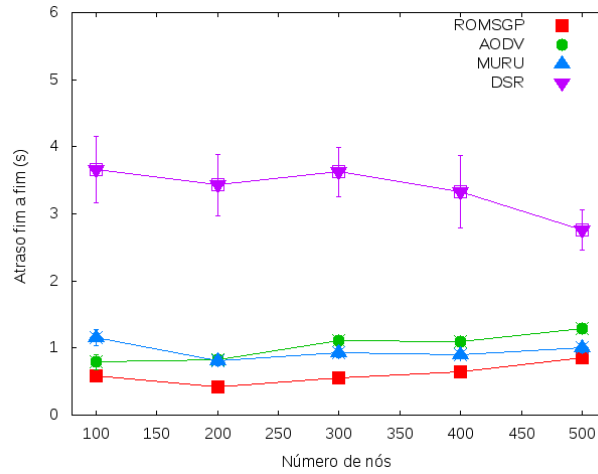


(c) 50% de nós fonte

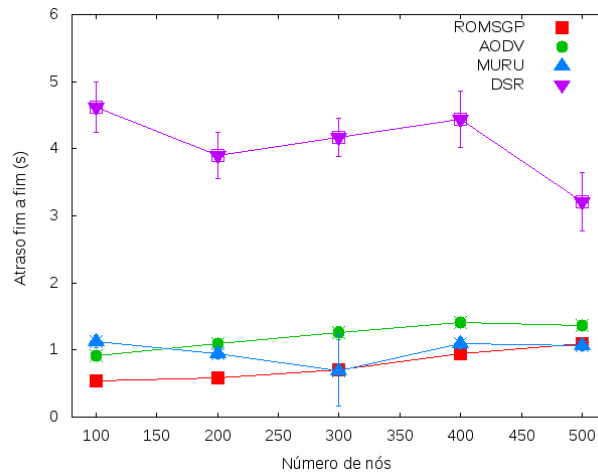
Figura 5.12: Atraso fim a fim de cada protocolo de roteamento em função da densidade de veículos no cenário urbano.



(a) 10% de nós fonte

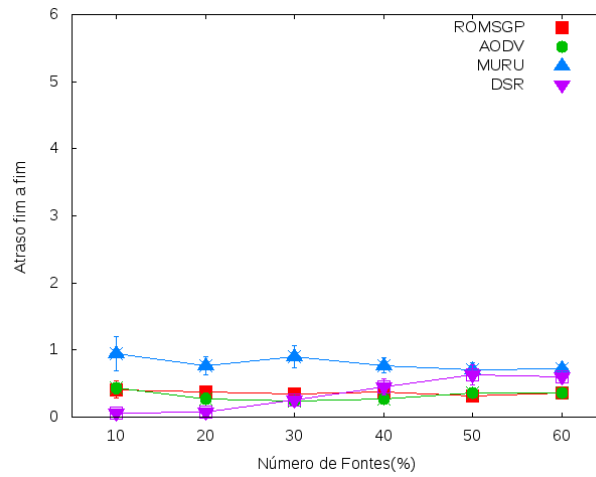


(b) 30% de nós fonte

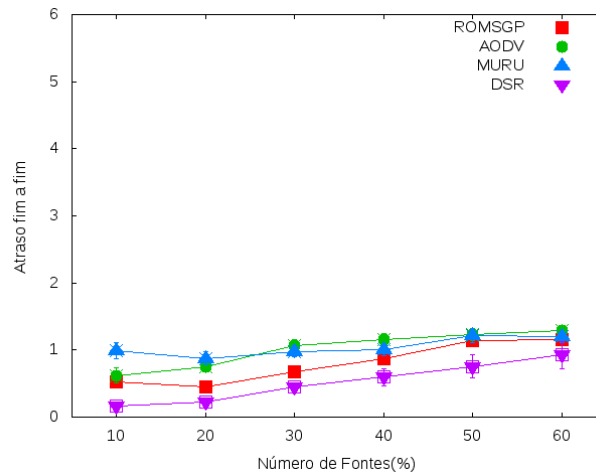


(c) 50% de nós fonte

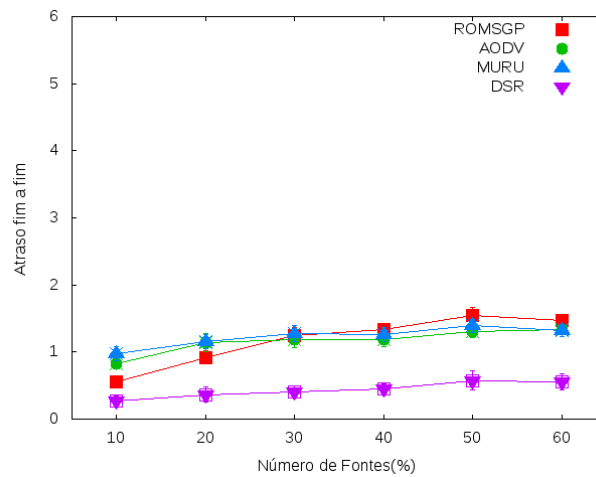
Figura 5.13: Atraso fim a fim de cada protocolo de roteamento em função da densidade de veículos no cenário de rodovia.



(a) 100 veículos

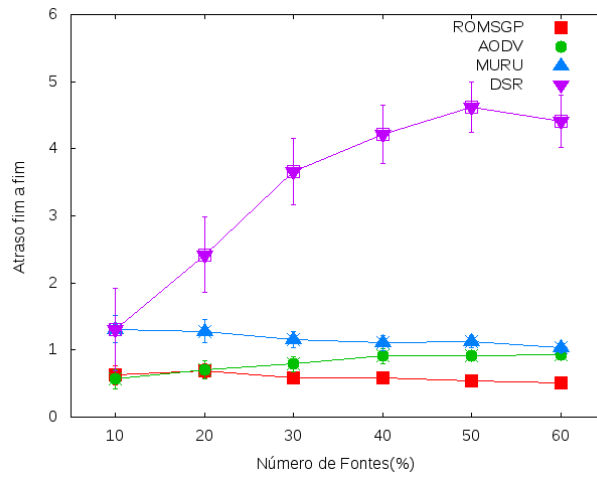


(b) 300 veículos

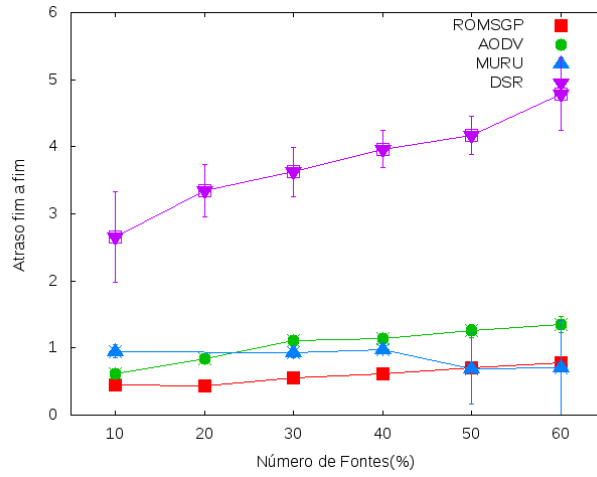


(c) 500 veículos

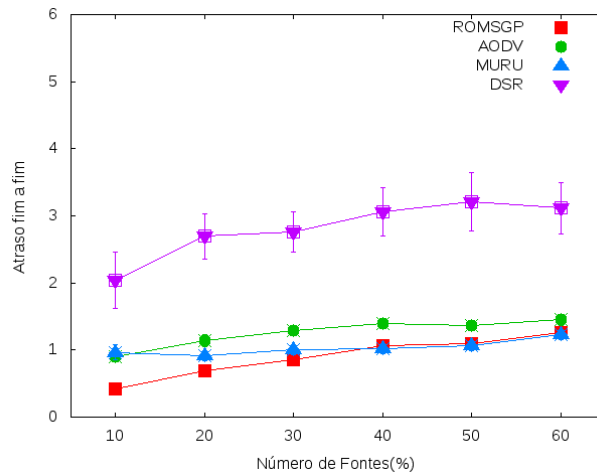
Figura 5.14: Atraso fim a fim de cada protocolo de roteamento em função do número de fontes no cenário urbano.



(a) 100 veículos



(b) 300 veículos



(c) 500 veículos

Figura 5.15: Atraso fim a fim de cada protocolo de roteamento em função do número de fontes no cenário de rodovia.

5.6 Discussão

Ao analisarmos a influência da densidade, da carga e da mobilidade no desempenho dos protocolos simulados, foi possível observar alguns pontos relevantes em relação ao roteamento em redes veiculares.

Um primeiro ponto importante é a relação entre a sobrecarga da rede e a taxa de entrega. Nos resultados obtidos foi possível observar que o desempenho dos protocolos em relação à taxa de entrega é bastante influenciado pela sobrecarga da rede, principalmente em redes densas. Por essa razão, os protocolos ROMSGP e MURU obtiveram melhores resultados nessas condições, já que esses protocolos utilizam mecanismos de controle de sobrecarga. Contudo, tais mecanismos também são responsáveis pelo baixo desempenho desses protocolos quando aplicados em redes veiculares esparsas. Nesse tipo de rede, os protocolos desenvolvidos para redes móveis *ad hoc* obtiveram melhores resultados que os alcançados pelos protocolos para redes veiculares, apesar de suas limitações, contrariando assim a literatura. Desta forma, podemos concluir que mecanismos para controle de sobrecarga são necessários para a realização do roteamento em redes veiculares, principalmente em redes densas. Contudo, a possibilidade de torná-los adaptativos, ajustando o seu funcionamento de acordo com a densidade da rede, deve ser considerada, vistos os resultados obtidos pelos protocolos nos cenários simulados.

Em relação ao desempenho alcançado pelos protocolos nos cenários simulados podemos verificar que eles obtiveram melhores resultados no cenário de rodovia, até mesmo o MURU que foi desenvolvido para atuar no cenário urbano. Isso ocorre devido ao padrão de mobilidade mais simples do cenário de rodovia. Logo, nós podemos concluir que protocolos específicos para cada cenário não são necessários, desde que eles utilizem informações de caráter geral da rede. Contudo, melhorias nos protocolos atuais devem ser realizadas já que as taxas de entrega alcançadas pelos protocolos em ambos os cenários não foram satisfatórias e que o máximo que um protocolo conseguiu entregar foi 95%, contudo, sob condições específicas da rede. Além disso, com a mudança das condições de rede, como densidade e carga, a taxa de entrega diminuiu atingindo níveis insatisfatórios.

Outro ponto importante observado nos resultados é o fato dos protocolos desenvolvidos para as redes móveis *ad hoc* apresentaram um desempenho superior aos projetados para redes veiculares. Desta forma, nós concluímos que apesar de características desfavoráveis para aplicação em redes veiculares [Perkins et al. 2001] [Nau-mov et al. 2006], esses protocolos ainda podem alcançar desempenho melhor que os

protocolos desenvolvidos para redes veiculares em cenários onde a densidade e carga da rede são baixas.

5.7 Conclusão

Neste capítulo apresentamos os resultados obtidos por meio de simulações dos protocolos para redes veiculares implementados, ROMSGP e MURU, em diferentes condições da rede e cenários. Nós efetuamos comparações com protocolos típicos das redes móveis *ad hoc*, AODV e DSR.

Como constatado através dos resultados apresentados na Seção 5.5, os protocolos de redes veiculares simulados, MURU e ROMSGP, nem sempre alcançam os melhores resultados. Entretanto, nós podemos concluir que o uso de parâmetros de mobilidade para realizar o roteamento é uma característica importante, devido ao baixo número de mensagens de erro de rotas enviadas por esses protocolos, consequência da escolha de caminhos mais estáveis.

Além disso, podemos concluir que os protocolos atuais não estão prontos para serem utilizados no mundo real. Melhorias nas métricas são necessárias. O controle de sobrecarga torna-se um item obrigatório nas redes veiculares, bem como uma abordagem adaptativa deve ser considerada. Apesar do cenário determinar a mobilidade dos nós, podemos concluir que não são necessários protocolos específicos para cada cenário, desde que eles utilizem informações de caráter geral da rede, como densidade e número de vizinhos.

Capítulo 6

Conclusões e Trabalhos Futuros

Diante das características das redes veiculares, tais como a dinamicidade da rede, a conectividade da rede e a mobilidade do nós, o roteamento torna-se uma tarefa desafiadora. Neste contexto, o principal objetivo desse trabalho foi analisar o impacto da densidade, da carga e da mobilidade no desempenho dos protocolos de roteamento nas redes veiculares. Os resultados dessa análise apresentam diretrizes para projetistas de redes que desejam desenvolver protocolos de roteamento eficazes capazes de se adaptar aos cenários urbano e de rodovia presentes nas redes veiculares. Na Seção 6.1 são detalhadas as principais contribuições alcançadas com a conclusão deste trabalho. E, na Seção 6.2 são discutidas possíveis perspectivas de trabalhos futuros decorrentes desta pesquisa.

6.1 Contribuições

Para que o objetivo principal desse trabalho, que é analisar o impacto da densidade, da carga e da mobilidade no desempenho dos protocolos de roteamento para redes veiculares, fosse alcançado, foi necessária a modelagem de cenários mais próximos do mundo real para serem utilizados em simulações. Com esse intuito, inicialmente foi necessário realizar um estudo sobre modelos de mobilidade para melhor representar o movimento dos veículos do mundo real e um estudo das ferramentas capazes de prover esses modelos. Para alcançar resultados mais confiáveis foi necessária a modelagem dos seguintes cenários típicos das redes veiculares: o cenário urbano e o cenário de rodovia. O cenário rural não foi considerado na análise realizada neste trabalho por ser o cenário menos importante das redes veiculares, já que a maior parte do tráfego de veículos em escala global ocorre em vias urbanas. Além disso, a grande divergência entre as características do cenário rural e dos outros

cenários, tornam a utilização de uma estratégia de roteamento capaz de possibilitar um bom desempenho dos protocolos nesses cenários mais difícil.

Para realizar os experimentos, foram implementados dois protocolos de roteamento para redes veiculares, o ROMSGP e o MURU. Nos experimentos esses protocolos foram comparados com dois protocolos da rede móvel *ad hoc*, o AODV e o DSR. A avaliação do desempenho desses protocolos foi realizada por meio de simulações de redes veiculares em diferentes condições de operação. Através dos resultados alcançados conclui-se que os protocolos de roteamento ainda precisam evoluir para alcançar um desempenho satisfatório. Contudo, alguns pontos relevantes relacionados à deficiência dos protocolos foram observados. Primeiramente, destacamos a necessidade do uso de métricas que utilizem informações presentes nos cenários mais variados. Também destacamos a necessidade de um mecanismo de controle de sobrecarga capaz de adaptar seu comportamento de acordo com a densidade da rede, já que, conforme os resultados apresentados, os mecanismos avaliados não alcançam um bom desempenho em redes pouco densas devido ao alto número de pacotes descartados, enquanto em redes densas o desempenho é satisfatório.

Para atingir o principal objetivo deste trabalho alcançamos algumas contribuições secundárias:

- **Comparação dos protocolos existentes:** Durante o desenvolvimento deste trabalho realizamos o levantamento do estado da arte do roteamento em redes veiculares. Foi realizado um estudo extensivo dos vários protocolos existentes e ao final foi realizada uma análise crítica e comparativa desses protocolos.
- **Integração do SUMO com o NS2:** Para realizar as simulações com um grau de realismo satisfatório foi necessário integrar duas ferramentas, o SUMO para realizar a simulação de mobilidade, e o NS2 para realizar a simulação de rede. Entretanto, devido a limitações técnicas dos simuladores envolvidos na integração, foi necessário realizar uma adaptação do código do NS2 para tornar as simulações mais realistas. O código fonte da adaptação está disponível em www.great.ufc.br/~brung/ns2.
- **Código fonte dos protocolos simulados:** Como não foi possível obter o código fonte dos protocolos MURU e ROMSGP, foi necessário realizar a implementação dos mesmos. Os códigos fontes dessas implementações estão disponíveis em www.great.ufc.br/~brung/ns2 e podem ser reutilizados.

6.2 Trabalhos Futuros

No decorrer desta dissertação, foram identificadas algumas questões que ainda necessitam ser aprofundadas e solucionadas. A seguir são listados alguns direcionamentos para possíveis trabalhos futuros decorrentes desta pesquisa:

- Analisar o impacto da velocidade dos veículos no desempenho dos protocolos de roteamento em redes veiculares;
- Propor um mecanismo de controle de sobrecarga adaptativo baseado na densidade da rede e avaliá-lo através de simulações;
- Estender a análise realizada neste trabalho incluindo o cenário rural; e
- Desenvolver um protocolo de roteamento que leve em consideração as diretrizes destacadas neste trabalho.

Referências Bibliográficas

- [AAA 2009] AAA (2009). Aaa - american automobile association. <http://www.aaa.com>. Acessado em 20 de Março de 2009.
- [Abedi et al. 2008] Abedi, O., Fathy, M., and Taghiloo, J. (2008). Enhancing aodv routing protocol using mobility parameters in vanet. In *IEEE/ACS International Conference on Computer Systems and Applications (AICCSA), 2008*.
- [Alam 2009] Alam, T. (2009). Mobility models used in simulation area of mobile ad hoc networks. *Advances in Wireless and Mobile Communications*, 2(2):115–134.
- [Azarmi et al. 2008] Azarmi, M., Sabaei, M., and Pedram, H. (2008). Adaptive routing protocols for vehicular ad hoc networks. In *International Symposium on Telecommunications (IST), 2008*.
- [Bernsen and Manivannan 2008] Bernsen, J. and Manivannan, D. (2008). Routing protocols for vehicular ad hoc networks that ensure quality of service. In *The 4th International Conference on Wireless and Mobile Communications (ICWMC), 2008*.
- [Boban et al. 2008] Boban, M., Misek, G., and Tonguz, O. (2008). What is the best achievable qos for unicast routing in vanets? In *IEEE GLOBECOM Workshops, 2008*.
- [Buruhanudeen et al. 2007] Buruhanudeen, S., Othman, M., and Ali, B. (2007). Mobility models, broadcasting methods and factors contributing towards the efficiency of the manet routing protocols: Overview. In *IEEE International Conference on Telecommunications and Malaysia International Conference on Communications (ICT-MICC), 2007*.
- [C2CCC 2009] C2CCC (2009). Car2car communications consortium. <http://www.car-2-car.org/>. Acessado em 20 de Março de 2009.

- [Camp et al. 2002] Camp, T., Boleng, J., and Wilcox, L. (2002). Location information services in mobile ad hoc networks. In *IEEE International Conference on Communications (ICC), 2002.*, volume 5.
- [Campos et al. 2004] Campos, C., Otero, D., and de Moraes, L. (2004). Realistic individual mobility markovian models for mobile ad hoc networks. In *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2004.*, volume 4.
- [Cavalcanti 2008] Cavalcanti, S. R. (2008). Veer: Um algoritmo de seleção de pares em redes ad hoc veiculares. *Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*
- [Chakeres and Perkins 2010] Chakeres, I. and Perkins, C. (2010). Dynamic manet on-demand (dymo) routing. *draft-ietf-manet-dymo-19.txt (work in progress).*
- [CNNMoney 2008] CNNMoney (2008). U.s. car accident cost. http://money.cnn.com/2008/03/05/news/economy/AAA_study/. Acessado em 20 de Março de 2009.
- [Cormen 2001] Cormen, T. (2001). *Introduction to algorithms.* The MIT press.
- [Denatran 2010a] Denatran (2010a). Código de trânsito brasileiro. www.denatran.gov.br/publicacoes/download/ctb.pdf. Acessado em Novembro de 2010.
- [Denatran 2010b] Denatran (2010b). Crescimento da frota nacional. <http://www.denatran.gov.br/frota.htm>. Acessado em 04 de Dezembro de 2010.
- [Dijkstra 1959] Dijkstra, E. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische mathematik*, 1(1):269–271.
- [Fiore 2009] Fiore, M. (2009). *Vehicular Networks: From Theory to Practice*, chapter Vehicular Mobility Models, pages 12[1–57]. Chapman & Hall/CRC.
- [Francisco J. Ros et al. 2009] Francisco J. Ros, Pedro M. Ruiz, Juan A. Sánchez, and Stojmenovi, I. (2009). *Vehicular Networks: From Theory to Practice*, chapter Vehicular Mobility Models, pages 9[1–43]. Chapman & Hall/CRC.
- [Gongjun Yan and Weigle 2009] Gongjun Yan, K. I. and Weigle, M. C. (2009). *Vehicular Networks: From Theory to Practice*, chapter Vehicular Network Simulators, pages 13[1–19]. Chapman & Hall/CRC.

- [Guoqing et al. 2008] Guoqing, Z., Dejun, M., Zhong, X., Weili, Y., and Xiaoyan, C. (2008). A survey on the routing schemes of urban vehicular ad hoc networks. In *27th Chinese Control Conference (CCC), 2008*.
- [Hartenstein and Laberteaux 2008] Hartenstein, H. and Laberteaux, K. (2008). A tutorial survey on vehicular ad hoc networks. *IEEE Communications Magazine*, 46(6):164–175.
- [Hartenstein et al. 2010] Hartenstein, H., Laberteaux, K., and Corporation, E. (2010). *VANET Vehicular Applications and Inter-Networking Technologies*. Wiley Online Library.
- [Huang et al. 2007] Huang, H., Li, X., Li, M., and Tang, F. (2007). A distance-based directional broadcast protocol for urban vehicular ad hoc network. In *International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCom), 2007*.
- [IEEE1609.1 2006] IEEE1609.1, P. (2006). IEEE trial-use standard for wireless access in vehicular environments (wave) - resource manager. *IEEE Std 1609.1-2006*, pages c1–63.
- [IEEE1609.2 2006] IEEE1609.2, P. (2006). IEEE trial-use standard for wireless access in vehicular environments (wave) - security services for applications and management messages. *IEEE Std 1609.2-2006*, pages c1–105.
- [IEEE1609.3 2007] IEEE1609.3, P. (2007). IEEE trial-use standard for wireless access in vehicular environments (wave) - networking services. *IEEE Std 1609.3-2007*, pages c1–87.
- [IEEE1609.4 2006] IEEE1609.4, P. (2006). IEEE trial-use standard for wireless access in vehicular environments (wave) - multi-channel operation. *IEEE Std 1609.4-2006*, pages c1–74.
- [IPEA 2006] IPEA (2006). Impactos sociais e econômicos dos acidentes de trânsito nas rodovias brasileiras. http://www.ipea.gov.br/sites/000/2/destaque/impactos_acidentetransito (Livro 2001).pdf. Acessado em 20 de Março de 2009.
- [Jakubiak and Koucheryavy 2008] Jakubiak, J. and Koucheryavy, Y. (2008). State of the art and research challenges for vanets. In *5th IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), 2008*.

- [Jerbi et al. 2006] Jerbi, M., Meraihi, R., Senouci, S., and Ghamri-Doudane, Y. (2006). Gytar: improved greedy traffic aware routing protocol for vehicular ad hoc networks in city environments. In *Proceedings of the 3rd international workshop on Vehicular ad hoc networks*, page 89. ACM.
- [Jin et al. 2009] Jin, Z., Yan, N., and Bing, L. (2009). Reliable on-demand geographic routing protocol resolving network disconnection for vanet. In *5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCom), 2009*.
- [Johnson et al. 2001] Johnson, D. B., Maltz, D. A., and Broch, J. (2001). Dsr: The dynamic source routing protocol for multi-hop wireless ad hoc networks. In *Ad Hoc Networking, edited by Charles E. Perkins, Chapter 5*. Addison-Wesley.
- [Karnadi et al. 2007] Karnadi, F., Mo, Z., and Lan, K. (2007). Rapid generation of realistic mobility models for vanet. In *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2007*. IEEE.
- [Karp and Kung 2000] Karp, B. and Kung, H. T. (2000). Gpsr: greedy perimeter stateless routing for wireless networks. In *Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking, (MobiCom) 2000*, New York, NY, USA. ACM.
- [Ko and Vaidya 2000] Ko, Y.-B. and Vaidya, N. H. (2000). Location-aided routing (lar) in mobile ad hoc networks. *Wirel. Netw.*, 6(4):307–321.
- [Li and Wang 2007] Li, F. and Wang, Y. (2007). Routing in vehicular ad hoc networks: A survey. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2(2):12–22.
- [Liu et al. 2008] Liu, L., Wang, Z., and Jehng, W.-K. (2008). A geographic source routing protocol for traffic sensing in urban environment. In *IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), 2008*.
- [Lochert et al. 2003] Lochert, C., Hartenstein, H., Tian, J., Fussler, H., Hermann, D., and Mauve, M. (2003). A routing strategy for vehicular ad hoc networks in city environments. In *Proceedings IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2003*.
- [Lochert et al. 2005] Lochert, C., Mauve, M., Fübler, H., and Hartenstein, H. (2005). Geographic routing in city scenarios. *SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev.*, 9(1):69–72.

- [Márcio Maia et al. 2008] Márcio Maia, Lincoln Rocha, and Andrade, R. (2008). Requisitos e desafios na construção de sistemas middleware para aplicações em redes ad hoc. In *Minicursos do Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos, (SBRC) 2008*.
- [McCanne and Floyd] McCanne, S. and Floyd, S. Ns-2 network simulator. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>. Acessado em 23 de Abril de 2009.
- [Mo et al. 2006] Mo, Z., Zhu, H., Makki, K., and Pissinou, N. (2006). Muru: A multi-hop routing protocol for urban vehicular ad hoc networks. In *3rd Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems - Workshops, 2006*.
- [Mohammad S. Almalag 2009] Mohammad S. Almalag (2009). *Vehicular Networks: From Theory to Practice*, chapter Safety-Related Vehicular Applications, pages 5[1–26]. Chapman & Hall/CRC.
- [Naumov et al. 2006] Naumov, V., Baumann, R., and Gross, T. (2006). An evaluation of inter-vehicle ad hoc networks based on realistic vehicular traces. In *Proceedings of the 7th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*. ACM New York, NY, USA.
- [Naumov and Gross 2007] Naumov, V. and Gross, T. (2007). Connectivity-aware routing (car) in vehicular ad-hoc networks. In *26th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM), 2007*.
- [OICA 2009] OICA (2009). Organisation internationale des constructeurs automobiles. <http://www.oica.net/>. Acessado em 20 de Março de 2009.
- [Oliveira and Otto C. M. B. Duarte 2007] Oliveira, C. T. and Otto C. M. B. Duarte (2007). Uma análise da probabilidade de entrega de mensagens em redes tolerantes a atrasos e desconexões. In *Anais do XXV Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC), 2007*.
- [Oliveira et al. 2008] Oliveira, C. T., Reinaldo B. Braga, Danilo M. Taveira, and Otto C. M. B. Duarte (2008). Uma proposta de roteamento probabilístico para redes tolerantes a atrasos e desconexões. In *Anais do XXVI Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC), 2008*.
- [openstreetmap 2009a] openstreetmap (2009a). Openstreetmap. <http://www.openstreetmap.org>.

- [openstreetmap 2009b] openstreetmap (2009b). Openstreetmap foundation. <http://www.osmfoundation.org>.
- [Perkins and Royer 1999] Perkins, C. and Royer, E. (1999). Ad-hoc on-demand distance vector routing. In *Proceedings of the 2th IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications (WMCSA), 2009*.
- [Perkins et al. 2001] Perkins, C., Royer, E., Das, S., and Marina, M. (2001). Performance comparison of two on-demand routing protocols for ad hoc networks. *IEEE Personal Communications*, 8(1):16–28.
- [Piorkowski et al. 2008] Piorkowski, M., Raya, M., Lugo, A., Papadimitratos, P., Grossglauser, M., and Hubaux, J. (2008). Trans: realistic joint traffic and network simulator for vanets. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 12(1):31–33.
- [Rafael Alves et al. 2009] Rafael Alves, Igor Campbell, Rodrigo de Souza Couto, Miguel Elias Mitre Campista, Igor Monteiro Moraes, Marcelo Rubinststein, Luis Henrique Costa, Otto Carlos Muniz Bandeira Duarte, and Abdalla, M. (2009). Redes veiculares: Princípios, aplicações e desafios. In *Minicursos do Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC), 2009*.
- [Sakhaee et al. 2007] Sakhaee, E., Taleb, T., Jamalipour, A., Kato, N., and Nemoto, Y. (2007). A novel scheme to reduce control overhead and increase link duration in highly mobile ad hoc networks. In *IEEE Wireless Communications and Networking Conference, (WCNC) 2007*.
- [Seet et al. 2004] Seet, B., Liu, G., Lee, B., Foh, C., Wong, K., and Lee, K. (2004). A-star: A mobile ad hoc routing strategy for metropolis vehicular communications. *Lecture Notes In Computer Science*, pages 989–999.
- [SUMO 2009] SUMO (2009). Sumo. <http://sumo.sourceforge.net/>. Acessado em 03 de Agosto de 2009.
- [Taleb et al. 2007] Taleb, T., Sakhaee, E., Jamalipour, A., Hashimoto, K., Kato, N., and Nemoto, Y. (2007). A stable routing protocol to support its services in vanet networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 56(6):3337–3347.
- [Tian et al. 2003] Tian, J., Han, L., and Rothermel, K. (2003). Spatially aware packet routing for mobile ad hoc inter-vehicle radio networks. volume 2.

- [Toh 1997] Toh, C.-K. (1997). Associativity-based routing for ad hoc mobile networks. *Wireless Personal Communications*, 4:103–139. 10.1023/A:1008812928561.
- [Tonguz and Boban 2010] Tonguz, O. K. and Boban, M. (2010). Multiplayer games over vehicular ad hoc networks: A new application. *Ad Hoc Netw.*, 8(5):531–543.
- [Uichin Lee et al. 2009] Uichin Lee, Ryan Cheung, and Gerla, M. (2009). *Vehicular Networks: From Theory to Practice*, chapter Emerging Vehicular Applications, pages 6[1–30]. Chapman & Hall/CRC.
- [Vahdat and Becker 2000] Vahdat, A. and Becker, D. (2000). Epidemic routing for partially connected ad hoc networks. Technical report, Citeseer.
- [VanetMobSim 2009] VanetMobSim (2009). Vanetmobsim. <http://vanet.eurecom.fr>. Acessado em 23 de Março de 2009.
- [Viriyasitavat et al. 2009] Viriyasitavat, W., Tonguz, O. K., and Bai, F. (2009). Network connectivity of vanets in urban areas. In *Proceedings of the 6th Annual IEEE communications society conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON), 2009.*, Piscataway, NJ, USA. IEEE Press.
- [Wegener et al. 2008] Wegener, A., Piórkowski, M., Raya, M., Hellbrück, H., Fischer, S., and Hubaux, J. (2008). Traci: an interface for coupling road traffic and network simulators. *Proceedings of the 11th communications and networking simulation symposium*, pages 155–163.
- [Wikimedia 2009a] Wikimedia (2009a). Rodovia marechal rondon. http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rodovia_Marechal_Rondon.jpg. Acessado em 20 de Fevereiro de 2009.
- [Wikimedia 2009b] Wikimedia (2009b). Rodovia washington luis. http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rodovia_Washington_Luis_2.jpg. Acessado em 20 de Fevereiro de 2009.
- [Zhang and Wolff 2008] Zhang, M. and Wolff, R. (2008). Routing protocols for vehicular ad hoc networks in rural areas. *Communications Magazine, IEEE*, 46(11):126–131.

- [Zhao and Cao 2008] Zhao, J. and Cao, G. (2008). Vadd: Vehicle-assisted data delivery in vehicular ad hoc networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 57(3):1910–1922.