



CONTROLE DISTRIBUÍDO DE TRÁFEGO BASEADO EM VEÍCULOS CONECTADOS

Fabício Barros Gonçalves

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas e Computação, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Sistemas e Computação.

Orientadores: Felipe Maia Galvão França
Claudio Luis de Amorim

Rio de Janeiro
Junho de 2017

CONTROLE DISTRIBUÍDO DE TRÁFEGO BASEADO EM VEÍCULOS
CONECTADOS

Fabício Barros Gonçalves

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE SISTEMAS E COMPUTAÇÃO.

Examinada por:

Prof. Felipe Maia Galvão França, Ph.D.

Prof. Cláudio Luis de Amorim, Ph.D.

Prof. Luis Felipe Magalhães de Moraes, Ph.D.

Prof. Valmir Carneiro Barbosa, Ph.D.

Prof. Paulo Cezar Martins Ribeiro, Ph.D.

Prof. Fábio Protti, D.Sc.

Prof. Diego Moreira de Araujo Carvalho, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
JUNHO DE 2017

Gonçalves, Fabrício Barros

Controle Distribuído de Tráfego Baseado em Veículos Conectados/Fabrício Barros Gonçalves. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2017.

XX, 117 p.: il.; 29, 7cm.

Orientadores: Felipe Maia Galvão França

Claudio Luis de Amorim

Tese (doutorado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia de Sistemas e Computação, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 111 – 117.

1. RAdNet-VE. 2. HRAdNet-VE. 3. Agentes. 4. Sistemas Multiagentes. 5. Controle Inteligente de Tráfego. 6. Planejamento e Orientação de Rotas. I. França, Felipe Maia Galvão *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Sistemas e Computação. III. Título.

À minha Aline, com amor.

Agradecimentos

Muitas são as pessoas a quem devo agradecer por esta conquista, pois acredito que a gratidão é uma virtude. Assim, mesmo correndo o risco de esquecer alguém, não posso deixar de citar alguns nomes e expressar a minha eterna gratidão, são eles:

- A Deus, o autor e consumidor da minha fé. Muito obrigado pela força para chegar até o fim, pela sabedoria para as escolhas certas, pelo auxílio das pessoas que você colocou no meu caminho para me ajudar e, por fim, por estar ao meu lado em todos os momentos;
- Ao povo brasileiro, que, nos últimos seis anos, financiou esta tese, pagando pesados impostos;
- Aos meus pais, que foram grandes auxiliares no meu processo de formação, desde a pré-escola até o mestrado;
- À minha esposa, Aline, que é minha parceira de vitórias, desde a minha graduação. Desde lá, você esteve sempre ao meu lado, atravessando momentos de grande felicidade e euforia, assim como momentos de grandes dificuldades, tristeza e angústia;
- Aos meus orientadores, Felipe Maia Galvão França e Claudio Luis de Amorim, que acreditaram em mim e tiveram grande paciência nos momentos em que fui faltoso como orientando. Sem o apoio de vocês, eu não teria conseguido ter êxito neste trabalho;
- Aos meus tios Antônio Carlos e Gessiléia, e à minha prima Vanessa e seu marido Marcelo, por facilitarem a minha estada no Rio de Janeiro durante o período em que precisei;
- Ao meu primo Vinícius, por facilitar a minha estadia em Niterói, enquanto eu cursava as disciplinas finais do curso de doutorado;
- Aos meus queridos ex-alunos e amigos, Daniel e Matheus, por terem compartilhado o apartamento em que vocês residem em Niterói, enquanto eu precisei ficar no Rio de Janeiro, a fim de me dedicar à minha pesquisa;

- Aos servidores do Instituto Federal de Ciência, Educação e Tecnologia, que tornaram possível o meu afastamento para conclusão do curso de doutorado;
- Aos servidores e funcionários do PESC, que sempre foram atenciosos e dedicados, quando precisei lidar com a burocracia acadêmica da COPPE;
- Aos meus amigos do LAM e LabIA, muito obrigado pelos momentos de descontração;
- Aos meus ex-bolsistas Bruno, Àtilla, Alessandro e Janderson, um muito obrigado pelo companheirismo e amizade;
- Ao CNPq, pela concessão da bolsa. Sem este recurso, o desenvolvimento desta tese não teria sido viabilizado;
- A todos que de alguma forma contribuíram para que este trabalho pudesse ser concluído. Espero um dia poder retribuir o apoio que me ofereceram.

Por fim, a melhor forma de expressar meus sentimentos por ter concluído esta tese, a partir de agora, é dedicando-me ainda mais como professor. Certamente, o que contribuirá muito para isso foi o aprendizado que obtive enquanto aluno do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas e Computação.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

CONTROLE DISTRIBUÍDO DE TRÁFEGO BASEADO EM VEÍCULOS CONECTADOS

Fabício Barros Gonçalves

Junho/2017

Orientadores: Felipe Maia Galvão França
Claudio Luis de Amorim

Programa: Engenharia de Sistemas e Computação

Por mais que sistemas avançados de gerenciamento de tráfego consigam lidar com o problema da heterogeneidade dos fluxos de tráfego das vias que incidem nas interseções de uma rede viária, estes têm o seu desempenho comprometido, quando o volume de tráfego da rede viária não é distribuído de maneira uniforme. Para tratar este problema, um sistema avançado de informações ao motorista deve ter total ciência do estado de operação de um sistema avançado de gerenciamento de tráfego. No entanto, este requisito não pode ser completamente satisfeito, devido à existência de lacunas existentes no estado da arte de sistemas avançados de gerenciamento de tráfego e sistemas avançados de informações ao motorista, em específico, a cooperação entre estes dois tipos de sistemas. Por isso, este trabalho propõe um sistema de controle distribuído de tráfego, em que agentes embutidos em veículos conectados, sinalizações semaforicas, elementos urbanos e um centro de controle de tráfego interagem uns com os outros, a fim de promover uma maior fluidez do tráfego veicular. Para tanto, os agentes dependem fortemente de uma rede veicular heterogênea. O trabalho também propõe uma rede veicular heterogênea cujo protocolo de comunicação é capaz de satisfazer os requisitos de comunicação de aplicações de serviços de sistemas inteligentes de transporte. De acordo com os resultados obtidos por meio de simulações, o sistema de controle distribuído de tráfego foi capaz de maximizar o fluxo de veículos e a velocidade média dos veículos, e minimizar o tempo de espera, número de paradas, tempo de viagem, consumo de combustível e emissões (CO, CO₂, HC, NO_x e PM_x).

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

DISTRIBUTED TRAFFIC CONTROL BASED ON CONNECTED VEHICLES

Fabício Barros Gonçalves

June/2017

Advisors: Felipe Maia Galvão França
Claudio Luis de Amorim

Department: Systems Engineering and Computer Science

Although advanced traffic management systems can deal with the heterogeneous traffic flows approaching of intersections, their performances are compromised, when the traffic volume is not distributed uniformly. To evenly distribute the traffic flow, an advanced driver information system should be aware of the traffic control operations. However, such requirement can not ultimately be satisfied due to the gaps in state of the art in advanced traffic management systems. Therefore, this study proposes a distributed traffic control system, in which agents embedded in connected vehicles, traffic signals, urban elements and a traffic control center interact with each other to provide a greater traffic fluidity. Therefore, the agents depend strongly on a heterogeneous vehicular network. In this sense, this study also proposes a heterogeneous vehicular network whose communication protocol can satisfy the communication requirements of intelligent transportation systems service applications. According to the results obtained from simulations, the distributed traffic control system was able to maximize the flow of vehicles and the mean speed of the vehicles, and minimize the wait time, travel time, fuel consume and emissions (CO, CO₂, HC, NO_x and PM_x).

Sumário

Lista de Figuras	xii
Lista de Tabelas	xiv
Lista de Abreviaturas e Siglas	xx
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos	5
1.3 Principais Contribuições	6
1.4 Organização do Trabalho	7
2 Referencial Teórico	8
2.1 Redes <i>Ad Hoc</i> Veiculares	8
2.1.1 Definição e Características	8
2.1.2 Modelos de Comunicação	9
2.1.3 Tecnologias de Acesso à Comunicação Sem Fio	10
2.2 Fundamentos de Engenharia de Tráfego	11
2.2.1 Estrutura de Rede de Tráfego	12
2.2.2 Parâmetros Macroscópicos e Microscópicos de Tráfego	12
2.2.3 Diagrama Fundamental de Fluxo de Tráfego	14
2.2.4 Controle de Tráfego por meio de Sinalizações Semafóricas	16
3 Redes Veiculares Centradas em Interesses	20
3.1 Rede <i>Ad Hoc</i> Veicular Centrada em Interesses	20
3.1.1 Tratando os Requisitos de Comunicação das Categorias de Aplicações para Redes <i>Ad Hoc</i> Veiculares	20
3.1.2 Descrição das Extensões das Estruturas de Dados e Mecanismos da RAdNet	23
3.1.3 Projeto do Protocolo de Comunicação da RAdNet-VE	25
3.2 Rede <i>Ad Hoc</i> Veicular Heterogênea Centrada em Interesses	29
3.2.1 Requisitos de Serviços de Sistemas Inteligentes de Transporte	30

3.2.2	Projeto da Rede Veicular Heterogênea Centrada em Interesses e seu Protocolo de Comunicação	31
3.3	Relação da RAdNet-VE e HRAdNet-VE com as Tecnologias de Acesso à Comunicação Sem Fio	33
4	Definição dos Agentes dos Sistemas Multiagentes	37
4.1	Agente Centro de Controle de Tráfego	37
4.2	Agente Elemento Urbano	40
4.3	Agente Veículo	42
4.4	Agente Sinalização Semafórica	44
5	Controle Inteligente de Tráfego Utilizando Sinalizações Semafóricas e Veículos Conectados	46
5.1	Controlando Tráfego em Interseções Isoladas	46
5.1.1	Monitoramento de Mudanças de Faixas ou Vias	47
5.1.2	Notificação de Presença de Veículo na Via	47
5.1.3	Obtenção de Quantidade de Veículos em Vias	48
5.1.4	Controle e Ajuste de Intervalos de Indicações de Sinalização .	49
5.2	Controlando o Tráfego de Sistemas Coordenados de Sinalizações Semafóricas	51
5.2.1	Ativação de um Sistema Coordenado de Sinalizações Semafóricas	51
5.2.2	Controle da Ativação de Sistemas Coordenados de Sinalizações Semafóricas	53
5.2.3	Obtenção de Quantidades de Veículos em Corredores	53
5.2.4	Ajuste de Demandas dos Sistemas Coordenados de Sinalizações Semafóricas	54
5.3	Notificando o Funcionamento das Sinalizações Semafóricas	55
5.4	Controlando Interseções com Veículos Conectados	55
6	Planejamento e Orientação Inteligentes de Rotas Baseado em Interesses de Motoristas	58
6.1	Registrando Interesses Relacionados aos Elementos Urbanos	58
6.2	Gerando Agendas de Intervalos de Indicações de Luzes Verdes	60
6.3	Compartilhando as Agendas de Intervalos de Indicações de Luzes Verdes	61
6.4	Calculando Rotas Ótimas	62
6.5	Alocando Espaços nas Vias	64
6.6	Agendas de Intervalos de Indicações de Luzes Verdes e o Controle de Interseções com Veículos Conectados	64
6.7	Veículos Conectados Cientes de Intervalos de Indicações de Luzes Verdes	65

7	Avaliação Experimental e Resultados	68
7.1	Metodologia Utilizada	68
7.2	Métricas para Medição de Desempenho	69
7.3	Avaliando a Rede Ad Hoc Veicular Centrada em Interesses	71
7.3.1	Análise dos Resultados do Cenário 1	71
7.3.2	Análise dos Resultados do Cenário 2	72
7.4	Avaliando a Rede Veicular Heterogênea Centrada em Interesses	72
7.4.1	Análise dos Resultados do Cenário 1	72
7.4.2	Análise dos Resultados do Cenário 2	78
7.5	Avaliando as Estratégias de Controle de Tráfego	85
7.5.1	Análise dos Resultados do Cenário 1	85
7.5.2	Análise dos Resultados do Cenário 2	87
7.6	Avaliando a Estratégia de Planejamento e Orientação de Rotas	89
7.6.1	Análise dos Resultados do Cenário 1	90
7.6.2	Análise dos Resultados do Cenário 2	93
7.7	Discussão	95
7.7.1	RAdNet-VE e HRAdNet-VE	95
7.7.2	Estratégias de Controle de Tráfego	98
7.7.3	Estratégia de Planejamento e Orientação de Rotas	100
8	Conclusões e Trabalhos Futuros	107
8.1	Conclusões	107
8.2	Publicações e Submissões	108
8.3	Trabalhos Futuros	108
	Referências Bibliográficas	111

Lista de Figuras

2.1	Diagrama fundamental de fluxo de tráfego. As partes tracejadas dos gráficos representam o regime de congestionamento. Os pontos de transição em cada curva são a densidade crítica e velocidade crítica. Fonte: [1].	15
2.2	Exemplo de uma interseção com movimentos e grupos de movimentos identificados: (a) Enumeração de movimentos em uma interseção sinalizada; (b) Grupo de movimentos norte-sul-norte; (c) Grupo de movimentos leste-oeste-leste. Fonte: KYTE e TRIBELHORN [2]. . .	17
3.1	RVEP nas camadas de rede: (a) RVEP como um substituto do IP em nós equipados com rádios baseados no padrão IEEE 802.11; (b) modelo de referência OSI; (c) RVEP como um substituto do IP em nós equipados com rádios baseados no padrão IEEE 802.11p	35
7.1	Distribuição do volume de tráfego realizada pelo algoritmo de roteamento baseado no caminho espacialmente mais curto durante experimento 1.	102
7.2	Distribuição do volume de tráfego realizada pelo algoritmo de roteamento baseado no caminho temporalmente mais curto durante experimento 1.	102
7.3	Distribuição do volume de tráfego realizada pelo algoritmo de roteamento orientado à ondas verdes mais curto durante experimento 1. . .	103
7.4	Distribuição do volume de tráfego realizada pelo algoritmo de roteamento baseado no caminho espacialmente mais curto durante experimento 2.	103
7.5	Distribuição do volume de tráfego realizada pelo algoritmo de roteamento baseado no caminho temporalmente mais curto durante experimento 2.	104
7.6	Distribuição do volume de tráfego realizada pelo algoritmo de roteamento orientado à ondas verdes mais curto durante experimento 2. . .	104

7.7	Distribuição do volume de tráfego realizada pelo algoritmo de roteamento baseado no caminho espacialmente mais curto durante experimento 3.	105
7.8	Distribuição do volume de tráfego realizada pelo algoritmo de roteamento baseado no caminho temporalmente mais curto durante experimento 3.	105
7.9	Distribuição do volume de tráfego realizada pelo algoritmo de roteamento orientado à ondas verdes mais curto durante experimento 3. . .	106

Lista de Tabelas

7.1	Resultados dos experimentos do cenário 1	71
7.2	Análise comparativa entre o desempenho da RAdNet-VE e os das demais redes no cenário 1.	71
7.3	Resultados dos experimentos do cenário 2	72
7.4	Análise comparativa entre o desempenho da RAdNet-VE e os das demais redes no cenário 2.	72
7.5	Resultados do grupo reativo no experimento 1 do cenário 1, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11n	73
7.6	Resultados do grupo reativo no experimento 1 do cenário 1, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11p	73
7.7	Resultados do grupo reativo no experimento 1 do cenário 1, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão LTE .	73
7.8	Análise comparativa entre o desempenho da HRAdNet-VE e os das demais redes do grupo reativo, utilizando os resultados do experimento 1 do cenário 1.	73
7.9	Resultados do grupo proativo no experimento 1 do cenário 1, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11n	74
7.10	Resultados do grupo proativo no experimento 1 do cenário 1, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11p	74
7.11	Resultados do grupo proativo no experimento 1 do cenário 1, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão LTE	74
7.12	Análise comparativa entre o desempenho da HRAdNet-VE e os das demais redes do grupo proativo, utilizando os resultados do experimento 1 do cenário 1.	74

7.13	Resultados do grupo reativo no experimento 2 do cenário 1, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11n	75
7.14	Resultados do grupo reativo no experimento 2 do cenário 1, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11p	75
7.15	Resultados do grupo reativo no experimento 2 do cenário 1, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão LTE .	75
7.16	Análise comparativa entre o desempenho da HRAdNet-VE e os das demais redes do grupo reativo, utilizando os resultados do experimento 2 do cenário 1.	75
7.17	Resultados do grupo proativo no experimento 2 do cenário 1, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11n	76
7.18	Resultados do grupo proativo no experimento 2 do cenário 1, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11p	76
7.19	Resultados do grupo proativo no experimento 2 do cenário 1, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão LTE	76
7.20	Análise comparativa entre o desempenho da HRAdNet-VE e os das demais redes do grupo proativo, utilizando os resultados do experimento 2 do cenário 1.	76
7.21	Resultados do grupo reativo no experimento 3 do cenário 1 utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11n	77
7.22	Resultados do grupo reativo no experimento 3 do cenário 1, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11p	77
7.23	Resultados do grupo reativo no experimento 3 do cenário 1, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão LTE .	77
7.24	Análise comparativa entre desempenho da HRAdNet-VE e os das demais redes do grupo reativo, utilizando os resultados do experimento 3 do cenário 1.	77
7.25	Resultados do grupo proativo no experimento 3 do cenário 1, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11n	78

7.26	Resultados do grupo proativo no experimento 3 do cenário 1, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11p	78
7.27	Resultados do grupo proativo no experimento 3 do cenário 1, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão LTE	78
7.28	Análise comparativa entre desempenho da HRAdNet-VE e os das demais redes do grupo proativo, utilizando os resultados do experimento 3 do cenário 1.	78
7.29	Resultados do grupo reativo no experimento 1 do cenário 2, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11n	79
7.30	Resultados do grupo reativo no experimento 1 do cenário 2, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11p	79
7.31	Resultados do grupo reativo no experimento 1 do cenário 2, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão LTE	79
7.32	Análise comparativa entre o desempenho da HRAdNet-VE e os das demais redes do grupo reativo, utilizando os resultados o experimento 1.	80
7.33	Resultados do grupo proativo no experimento 1 do cenário 2, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11n	80
7.34	Resultados do grupo proativo no experimento 1 do cenário 2, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11p	80
7.35	Resultados do grupo proativo no experimento 1 do cenário 2, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão LTE	80
7.36	Análise comparativa entre o desempenho da HRAdNet-VE e os das demais redes do grupo proativo, utilizando os resultados do experimento 1.	81
7.37	Resultados do grupo reativo no experimento 2 do cenário 2, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11n	81
7.38	Resultados do grupo reativo no experimento 2 do cenário 2, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11p	81

7.39	Resultados do grupo reativo no experimento 2 do cenário 2, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão LTE	81
7.40	Análise comparativa entre o desempenho da HRAdNet-VE e os desempenhos das demais redes do grupo reativo, utilizando os dados obtidos no experimento 2 do cenário 2.	82
7.41	Resultados do grupo proativo no experimento 2 do cenário 2, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11n	82
7.42	Resultados do grupo proativo no experimento 2 do cenário 2, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11p	82
7.43	Resultados do grupo proativo no experimento 2 do cenário 2, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão LTE	83
7.44	Análise comparativa entre o desempenho da HRAdNet-VE e os desempenhos das demais redes do grupo proativo, utilizando os dados obtidos no experimento 2 do cenário 2.	83
7.45	Resultados do grupo reativo no experimento 3 do cenário 2, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11n	83
7.46	Resultados do grupo reativo no experimento 3 do cenário 2, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11p	83
7.47	Resultados do grupo reativo no experimento 3 do cenário 2, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão LTE	84
7.48	Análise comparativa entre o desempenho da HRAdNet-VE e os desempenhos das demais redes do grupo reativo, utilizando os dados obtidos no experimento 3 do cenário 2.	84
7.49	Resultados do grupo proativo no experimento 3 do cenário 2, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11n	84
7.50	Resultados do grupo proativo no experimento 3 do cenário 2, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11p	84
7.51	Resultados do grupo proativo no experimento 3 do cenário 2, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão LTE	85

7.52	Análise comparativa entre o desempenho da HRAdNet-VE e os desempenhos das demais redes do grupo proativo, utilizando os dados obtidos no experimento 3 do cenário 2.	85
7.53	Desempenhos do sistema de controle de tráfego baseado em sinalizações semaforicas pré-temporizadas, $SMER_I$ e $SMER_{I+C}$ no experimento 1 do cenário 1.	86
7.54	Comparação dos desempenhos de $SMER_I$ e $SMER_{I+C}$ contra o desempenho do sistema de controle de tráfego baseado em sinalizações semaforicas pré-temporizadas, utilizando os resultados obtidos no experimento 1 do cenário 1.	86
7.55	Resultados obtidos com o sistema de controle de tráfego baseado em sinalizações semaforicas pré-temporizadas, $SMER_I$ e $SMER_{I+C}$ no experimento 2 do cenário 1.	86
7.56	Comparação dos desempenhos de $SMER_I$ e $SMER_{I+C}$ contra o desempenho do sistema de controle de tráfego baseado em sinalizações semaforicas pré-temporizadas, utilizando os resultados obtidos no experimento 2 do cenário 1.	87
7.57	Resultados obtidos com o sistema de controle de tráfego baseado em sinalizações semaforicas pré-temporizadas, $SMER_I$ e $SMER_{I+C}$ no experimento 3 do cenário 1.	87
7.58	Comparação dos desempenhos de $SMER_I$ e $SMER_{I+C}$ contra o desempenho do sistema de controle de tráfego baseado em sinalizações semaforicas pré-temporizadas, utilizando os resultados obtidos no experimento 3 do cenário 1.	87
7.59	Resultados obtidos com $SMER_I^2$ e $SMER_{I+C}^2$ no experimento 1 do cenário 2.	88
7.60	Comparação dos desempenhos de $SMER_I^2$ e $SMER_{I+C}^2$ contra os desempenhos de $SMER_I^1$ e $SMER_{I+C}^1$, utilizando os resultados obtidos no experimento 1 do cenário 1.	88
7.61	Resultados obtidos com $SMER_I^2$ e $SMER_{I+C}^2$ no experimento 2 do cenário 2.	88
7.62	Comparação dos desempenhos de $SMER_I^2$ e $SMER_{I+C}^2$ contra os desempenhos de $SMER_I^1$ e $SMER_{I+C}^1$, utilizando os resultados obtidos no experimento 2 do cenário 1.	89
7.63	Resultados obtidos com $SMER_I^2$ e $SMER_{I+C}^2$ no experimento 3 do cenário 2.	89
7.64	Comparação dos desempenhos de $SMER_I^2$ e $SMER_{I+C}^2$ contra os desempenhos de $SMER_I^1$ e $SMER_{I+C}^1$, utilizando os resultados obtidos no experimento 3 do cenário 1.	89

7.65	Resultados obtidos com o ROOV, RCEMC e RCTMC no experimento 1 do cenário 1.	90
7.66	Comparação do desempenho do ROOV contra os desempenhos do RCEMC e RCTMC, utilizando os dados obtidos no experimento 1 do cenário 1.	90
7.67	Resultados obtidos com o ROOV, RCEMC e RCTMC no experimento 2 do cenário 1.	91
7.68	Comparação do desempenho do ROOV contra os desempenhos do RCEMC e RCTMC, utilizando os dados obtidos no experimento 2 do cenário 1.	91
7.69	Resultados obtidos com o ROOV, RCEMC e RCTMC no experimento 3 do cenário 1.	92
7.70	Comparação do desempenho do ROOV contra os desempenhos do RCEMC e RCTMC, utilizando os dados obtidos no experimento 3 do cenário 1.	92
7.71	Resultados obtidos com ROOV nos experimentos 1 dos cenários 1 e 2.	93
7.72	Comparação dos desempenhos do ROOV ² contra os do ROOV ¹ , utilizando os resultados obtidos no experimento 1 do cenário 2.	93
7.73	Resultados obtidos com ROOV nos experimentos 2 dos cenários 1 e 2.	94
7.74	Comparação dos desempenhos do ROOV ² contra os do ROOV ¹ , utilizando os resultados obtidos no experimento 2 do cenário 2.	94
7.75	Resultados obtidos com ROOV nos experimentos 3 dos cenários 1 e 2.	95
7.76	Comparação dos desempenhos do ROOV ² contra os do ROOV ¹ , utilizando os resultados obtidos no experimento 3 do cenário 2.	95

Lista de Abreviaturas e Siglas

3GPP	Third Generation Partnership Project
AODV	Ad Hoc On-Demand Distance Vector
CCN	Content-Centric Network
D2D	Device-to-Device
DSR	Dynamic Source Routing
eNodeB	Evolved Node B
GPS	Global Positioning System
GPSR	Greedy Perimeter Stateless Routing
GSM	Global System for Mobile Communications
HRAdNet-VE	H eterogeneous I n R est-Centric Mobile A d Hoc N etwork for V ehicular E nvironments
HRVEP	HRAdNet-VE Protocol
ICN	Information-Centric Network
LTE	Long Term Evolution
MFU	Most Frequently Used
MIMO	Multiple Input Multiple Output
OBU	On-Board Unit
RadNet	I n R est-Centric Mobile A d Hoc N etwork
RadNet-VE	I n R est-Centric Mobile A d Hoc N etwork for V ehicular E nvironments
RCEMC	Roteamento Baseado em Caminho Espacialmente mais Curto
RCTMC	Roteamento Baseado em Caminho Temporalmente mais Curto
ROOV	Roteamento Orientado à Ondas Verdes
RSU	Roadside Unit
RVEP	RadNet-VE Protocol
SER	Scheduling by Edge Reversal
SMER	Scheduling by Multiple Edge Reversal
UE	User Equipment
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
URI	Universal Resource Identifier
VANET	Vehicular Ad Hoc Networks
WAVE	Wireless Access Vehicular Environment
WSA	WAVE Service Advertisement
WSM	WAVE Short Message

Capítulo 1

Introdução

Por mais que sistemas avançados de gerenciamento de tráfego [3] consigam lidar com o problema da heterogeneidade dos fluxos de tráfego das vias de entradas das interseções de uma rede viária, estes têm o seu desempenho comprometido, quando o volume de tráfego da rede viária não é distribuído de maneira uniforme. Como consequência, os intervalos de indicação da luz verde, nas vias pouco utilizadas, são desperdiçados. Por isto, um segundo problema precisa ser enfrentado, que é o planejamento e orientação de rotas. Para tratá-lo, um sistema avançado de informações ao motorista [3] deve ter total ciência do estado de operação de um sistema avançado de gerenciamento de tráfego. No entanto, este requisito não pode ser completamente satisfeito, devido a existência de lacunas existentes no estado da arte desses sistemas de gerenciamento de tráfego, sistemas avançados de informações ao motorista e redes veiculares.

1.1 Motivação

Após todo o levantamento bibliográfico acerca dos métodos de controle tráfego ([4–16]) e métodos de planejamento e orientação de rotas ([17–21], percebeu-se que tais podem ser complementares uns aos outros. Métodos como os utilizados em sistemas multiagentes, baseados em alocação de recursos, podem tirar proveito dos tempos das fases das interseções, ainda que estes possam ser alterados, de acordo com alguma política de adaptação de intervalos de indicações de luzes verdes em função dos fluxos de tráfegos em vias de entrada de interseções. Dessa forma, um mecanismo de planejamento e orientação de rotas pode distribuir o volume de tráfego sobre uma rede viária controlada por sinalizações semaforicas, alocando espaços nas vias para os veículos e fazendo com que eles trafeguem em vias participantes de rotas ótimas, sem que estes precisem parar constantemente. Neste caso, a cooperação entre sistemas avançados de gerenciamento de tráfego e sistemas avançados de informações ao motorista permite que o planejamento de rotas tenha ciência das programações

das sinalizações semafóricas ao longo do tempo. Para tanto, é fundamental que o método de controle de tráfego seja adequado para a geração de uma agenda global de intervalos de indicações de luzes verdes, de modo que esta sirva de base para construção de uma solução para o problema de planejamento e orientação de rotas.

Os métodos de controle de tráfego baseados em otimização [4, 6–8] necessitam de uma infraestrutura computacional centralizada e de alto custo, que é utilizada para o processamento das otimizações de fases de todas as interseções pertencentes ao sistema de controle de tráfego. A disponibilização de uma agenda de intervalos de indicações de luzes verdes por meio de uma infraestrutura computacional centralizada gera um grande custo de comunicação e leitura e escrita, à medida que uma grande quantidade de veículos solicita cálculos de rotas ótimas. Neste caso, estrutura centralizada pode se tornar um gargalo e, com isto, pode influenciar no tempo de resposta das requisições, fazendo com que o planejamento e orientação de rotas trabalhe com dados defasados. Vale ressaltar que, enquanto os veículos esperam por rotas ótimas, eles se movem ao longo das vias da rede viária. Logo, se a latência de resposta de uma requisição para o cálculo de uma rota ótima é alta, os motoristas dos veículos podem não ser informados a tempo de realizar alguma manobra, podendo, então, ser necessário iniciar um processo de recálculo de rota ótima.

Os métodos de controle de tráfego baseados em adaptação [5, 9–16] são capazes de coletar os dados por meio de detectores de tráfego instalados nas vias e, de tempos em tempos, realizar uma computação local, a fim de calcular os novos tamanhos de intervalos de indicações de luzes verdes das sinalizações semafóricas. Neste sentido, as decisões de ajustar as fases das sinalizações semafóricas são tomadas localmente. Por meio das decisões de todas as sinalizações semafóricas pertencentes ao sistema de controle de tráfego, a otimização do fluxo de tráfego é realizada de maneira descentralizada. Esses métodos são categorizados da seguinte forma: baseados em aprendizado por reforço e baseados em auto-organização.

Devido à incapacidade de se adaptarem facilmente às flutuações frequentes dos fluxos de tráfego, que é ocasionada pela necessidade de uma estabilidade do volume de tráfego para a construção de uma base de conhecimento acerca dos padrões macroscópicos dos fluxos de tráfego das vias, métodos de controle de tráfego baseados em adaptação por meio de aprendizado por reforço tendem a gerar agendas de tempos similares às que podem ser geradas por sinalizações semafóricas de tempos pré-fixados. Assim, qualquer mudança no padrão macroscópico de tráfego, que resulte em um padrão não existente na base de conhecimento de uma via, pode gerar um gargalo em uma parte específica da rede viária. Ainda que os métodos de controle de tráfego baseados em adaptação por meio de aprendizado por reforço possam criar um sistema totalmente descentralizado de controle de tráfego com

baixo custo de operação, devido à baixa adaptabilidade em relação aos fluxos de tráfego com flutuações frequentes, tais métodos não são adequados para a construção de sistemas avançados de gerenciamento de tráfego, em que uma das expectativas é cooperar com sistemas avançados de informações ao motorista, no que tange o fornecimento de planejamento e orientação de rotas.

Por outro lado, embora existam métodos baseados em adaptação por auto-organização, estes também apresentam dificuldades, quando se deseja utilizá-los na construção de sistemas avançados de controle de tráfego com intuito de cooperar com sistemas avançados de informações ao motorista, compartilhando agendas de intervalos de indicações de luzes verdes das sinalizações semafóricas, de modo que um mecanismo de planejamento de rotas possa utilizá-las para alocar espaços nas vias de entradas das interseções. Nestes métodos, o controle das sinalizações semafóricas é programado para identificar as chegadas de pelotões de veículos nas interseções. Sendo assim, as agendas de intervalos de indicações de luzes verdes das sinalizações semafóricas precisam ser atualizadas a cada detecção de um pelotão de veículos. Isso faz com que o aproveitamento da agenda de tempos das programações das sinalizações semafóricas, por parte de um mecanismo de planejamento e orientação de rotas, seja comprometido. Por causa de uma grande variação de estado de tais agendas, um mecanismo de planejamento e orientação de rotas pode calcular uma rota ótima com base em cópias de agendas de intervalos de indicações de luzes verdes desatualizadas. Como consequência, isso pode levar a um desbalanceamento na distribuição do volume de tráfego sobre as vias de uma rede viária. Por fim, as sinalizações semafóricas tendem a sofrer com o alto *overhead* de comunicação e de leitura e escrita, à medida que recebem e processam requisições de novos cálculos de rotas ótimas e, em seguida, registram os veículos nas agendas de intervalos de indicações de luzes verdes, geradas com intuito de alocar espaços nas vias de entrada em cada uma das interseções pertencentes às rotas ótimas calculadas.

Devido à alta mobilidade dos veículos e à topologia dinâmica das redes *ad hoc* veiculares, é difícil fornecer serviços de sistemas inteligentes de transporte usando uma rede veicular baseada em uma única tecnologia de acesso à comunicação sem fio, tal como a de rádios de comunicação dedicada de curta distância. Atualmente, as tecnologias de acesso à comunicação sem fio disponíveis para ambientes veiculares são aquelas baseadas em rádios de comunicação de curta distância (IEEE 802.11 [22], and IEEE 802.11p [23]) e aquelas baseadas em redes celulares (GSM, UMTS, and LTE) [24][25]. No entanto, essas tecnologias têm suas limitações quando são usadas em ambientes veiculares. No que diz respeito às tecnologias de acesso à comunicação sem fio baseadas em comunicações dedicadas de curta distância, essas foram projetadas para fornecer comunicações sem fio sem necessitar de uma infraestrutura pervasiva em ambientes como rodovias, estradas e ruas. Por outro lado, embora re-

des celulares possam fornecer uma ampla cobertura geográfica, ela não pode fornecer trocas de informações de tempo real em áreas locais de maneira eficiente. Por isso, integrar redes baseadas em diferentes tecnologias de acesso à comunicação sem fio é fundamental para o desenvolvimento de aplicações de serviços de sistemas inteligentes de transporte. De acordo com ZHENG *et al.* [24], redes veiculares heterogêneas podem ser uma excelente plataforma para satisfazer os requisitos de comunicação de aplicações de serviços de sistemas inteligentes de transporte.

Para esse fim, métodos de comunicação propostos para facilitar a comunicação entre nós em redes *ad hoc* veiculares podem ser adotados em redes veiculares heterogêneas, pois eles são projetados para lidar com características relacionadas às redes *ad hoc* veiculares. Tais características são as seguintes: conectividade intermitente, topologias altamente dinâmicas e mudanças constantes de densidade. Apesar disso, muitos desses métodos são adequados somente para comunicações infraestrutura-estrutura e inadequados para comunicações veículo-a-veículo e veículo-estrutura, pois eles são projetados para redes centradas em IP.

Nessas redes, nós origem precisam conhecer os endereços dos nós destino, a fim de estabelecer comunicação fim-a-fim e descobrir rotas. Em ambientes veiculares altamente dinâmicos, os nós produzem um alto custo de mensagens para encontrar rotas e atualizar suas tabelas de roteamento. Além disto, a comunicação entre nós é intermitente, pois a topologia de rede é altamente dinâmica. Por essas razões, BAI e KRISHNAMACHARI [26] e AMADEO *et al.* [27] têm argumentado por uma troca de paradigma em redes veiculares.

Neste sentido, alguns pesquisadores têm identificado as redes centradas em informação (ICNs - *Information-Centric Networks*) [28] como um paradigma chave, pois elas oferecem uma solução atrativa para ambientes móveis e altamente dinâmicos tais como as VANETs. Entre os modelos arquiteturais encontrados na literatura de ICN, as redes centradas em conteúdos (CCNs - *Content-Centric Networks*) têm ganhado proeminência em trabalhos sobre redes veiculares [29–33]. Embora as CCNs sejam mais promissoras que os modelos centrados em IP em ambientes veiculares, existem algumas limitações quanto a adoção destas em projetos de VANETs. Por exemplo, a inundação da rede com pacotes de interesses cuja causa provém das políticas de encaminhamento de pacotes de interesses. Nestas, tais pacotes são encaminhados para todos os vizinhos de um nó, à medida que este os recebe. Isso possibilita o surgimento de broadcast storms. Além disso, o modelo da CCN usa estruturas de dados semelhantes às tabelas de roteamento e adota algoritmos similares ao AODV [34], DSR [35] e GPSR [36]. Tais algoritmos são vulneráveis em ambientes veiculares altamente dinâmicos devido à intermitência de caminho [37]. Por fim, embora existam estudos promissores no campo de redes veiculares, estes têm somente focado em cenários relacionados a serviços populares de dados compar-

tilháveis [37]. Consequentemente, cenários em que aplicações precisam trocar um grande montante de dados sensíveis a atraso não têm sido estudados. Aplicações com essas características fazem uso de serviços de dados sem cache [37], tais como: controle de sinalizações semafóricas por meio da cooperação de veículos conectados, controle cooperativo e adaptativo de cruzamento, entre outros.

1.2 Objetivos

O objetivo principal desta tese é tratar os problemas de controle de tráfego e, planejamento e orientação de rotas em sistemas inteligentes de transporte. Para alcançar esse objetivo, esta tese propõe um controle distribuído de tráfego baseado em veículos conectados, uma vez que sistemas inteligentes de transporte têm se tornado cada vez mais dependentes de ambientes de redes veiculares. Esta proposta, por sua vez, define os seguintes objetivos específicos:

1. Projetar um novo modelo de rede centrada em informação, que leve em consideração os requisitos de comunicação de aplicações de serviços de sistemas inteligentes de transporte;
2. Criar um protocolo de comunicação para ambientes de redes veiculares heterogêneas, a fim de satisfazer os requisitos de comunicação de aplicações de serviços de sistemas inteligentes de transporte, que são: baixa latência de comunicação entre nós, altas taxas de entrega de dados, escopos de comunicação bem definidos, escalabilidade e baixo custo de comunicação de estruturas de grupos [38][24].
3. Controlar interseções de uma rede viária por meio de sinalizações semafóricas, utilizando uma estratégia de controle distribuído, que faz uso de cooperações entre veículos conectados e sinalizações semafóricas em um ambiente veicular, a fim de detectar flutuações de tráfego nas vias de entrada das interseções e, com base nestas flutuações, realizar os ajustes dos tamanhos dos intervalos de luzes de maneira ótima;
4. Controlar interseções compartilhadas entre sistemas coordenados de sinalizações semafóricas, utilizando uma estratégia de controle distribuído baseada na cooperação entre as sinalizações semafóricas pertencentes à infraestrutura de controle de tráfego de uma rede viária, a fim de fornecer acesso ininterrupto a pelotões de veículos em interseções participantes de corredores, em que as sinalizações semafóricas têm seus intervalos de luzes verdes sincronizados uns com os outros;

5. Utilizar as configurações de controle de interseções, que são produzidas pelas estratégias de controle distribuído, a fim de gerar agendas de intervalos de luzes verdes que forneçam dados sobre os períodos em que as vias de entrada das interseções recebem luzes verdes ao longo do tempo;
6. Compartilhar as configurações de controle de interseções entre as sinalizações semaforicas, de modo que estas possam ser utilizadas para gerar agendas de intervalos de luzes verdes localmente, a fim de que cada sinalização semaforica do sistema de controle de tráfego conheça os períodos em que as vias de entrada das interseções de uma rede viária recebem luzes verdes ao longo do tempo;
7. Construir uma estratégia de planejamento e orientação de rotas que tire proveito dos períodos em que as vias de entrada das interseções de uma rede viária recebem luzes verdes, a fim de calcular rotas ótimas e, com base nestas, alocar espaços nas vias, a fim de distribuir uniformemente o volume de tráfego sobre as vias de uma rede viária;

1.3 Principais Contribuições

Esta tese contribui diretamente em três áreas distintas de pesquisa, a saber: redes veiculares, controle de tráfego e planejamento e orientação de rotas.

As contribuições na área de redes veiculares são as seguintes:

- Proposta de uma nova ICN cuja troca de mensagens é baseada somente em interesses definidos por aplicações para VANETs. Esta proposta recebeu o nome de RAdNet-VE [39], que é uma extensão da RAdNet [40] para ambientes veiculares;
- Demonstração da viabilidade da RAdNet-VE como uma VANET, utilizando simulações de ambientes de redes veiculares com nós equipados com interfaces de acesso à comunicação baseadas nos padrões IEEE 802.11n e IEEE 802.11p;
- Proposta de uma nova ICN cuja troca de mensagens é baseada somente em interesses definidos por aplicações de serviços de sistemas inteligentes de transporte, operando em ambientes de redes veiculares heterogêneas. Esta proposta recebeu o nome de HRAdNet-VE, que é uma extensão da RAdNet-VE para ambientes veiculares heterogêneos;
- Demonstração da viabilidade da HRAdNet-VE como uma rede veicular heterogênea, utilizando simulações de ambientes de redes veiculares com nós equipados com interfaces de acesso à comunicação baseadas nos padrões IEEE 802.11n, IEEE 802.11p e LTE;

As contribuições na área de controle de tráfego são as seguintes:

- Extensões das estratégias de controle distribuído de tráfego propostas por PAIVA [1].
- Propostas de estratégias de controle de tráfego distribuído tolerante às ausências de funcionamento de sinalizações semaforicas. Tal mecanismo faz uso de veículos conectados para controlar interseções isoladas e cooperar em operações de sistemas coordenados de sinalizações semaforicas;
- Avaliações experimentais das estratégias de controle de tráfego distribuído tolerante às ausências de funcionamento de sinalizações semaforicas, operando sobre um ambiente de rede veicular heterogênea;

Por fim, as contribuições na área de planejamento e orientação são as seguintes:

- Extensões da estratégia de planejamento e orientação de rotas orientados à ondas verdes proposta por FARIA [41];
- Proposta de um mecanismo de geração e compartilhamento de agendas de intervalos de indicações de luzes verdes, utilizando dados relativos ao estado do controle de interseções, sendo estas isoladas ou participantes de sistemas coordenados de sinalizações semaforicas;
- Proposta de um mecanismo de alocação de espaços em vias baseado nos tamanhos de veículos e comprimento de vias, de modo que este possa ser utilizado para prever e evitar congestionamentos, à medida que o volume de tráfego de uma rede viária é distribuído ao longo do tempo.

1.4 Organização do Trabalho

Os estudos, propostas e análises realizados durante este trabalho foram organizados como segue. O Capítulo 2 apresenta o referencial teórico. O Capítulo 3 apresenta duas propostas de redes veiculares centradas em interesses. O Capítulo 4 apresenta as definições dos agentes utilizados nos sistemas multiagentes propostos nesta tese. O Capítulo 5 apresenta uma proposta de sistema multiagente para controle inteligente de tráfego baseado em sinalizações semaforicas inteligentes e veículos conectados. O Capítulo 6 apresenta a proposta de um sistema multiagente de planejamento e orientação inteligentes de rota baseado nos interesses de motoristas. O Capítulo 7 apresenta as avaliações experimentais das propostas apresentadas nos Capítulos 3, 5 e 6. Por fim, o Capítulo 7 apresenta as conclusões e trabalhos futuros acerca das propostas apresentadas nesta tese.

Capítulo 2

Referencial Teórico

Para a elaboração da proposta desta tese, foi necessário realizar um estudo aprofundado acerca das teorias e conceitos que pudessem fundamentar esse trabalho. Para tanto, foi realizado um levantamento bibliográfico sobre redes *ad hoc* veiculares e fundamentos de engenharia de tráfego.

Para fins mais práticos, também foram realizados levantamentos bibliográficos a respeito dos seguintes assuntos: sistemas inteligentes de transporte, agentes e sistemas multiagentes, escalonamento por reversão múltipla de arestas e escalonamento em sistemas flexíveis de manufatura. O levantamento bibliográfico relativo a estes assuntos está disponível no relatório técnico em [42]. Além disso, em GONÇALVES [42], também é realizado um detalhamento sobre como esta tese se apropriou de cada um dos assuntos citados até aqui.

2.1 Redes *Ad Hoc* Veiculares

Este capítulo tem como objetivo apresentar um levantamento bibliográfico acerca do referencial teórico em torno de redes *ad hoc* veiculares. Portanto, ele aborda os seguintes assuntos: definição e características de redes *ad hoc* veiculares; modelos de comunicação; tecnologias de acesso à comunicação sem fio. Cada um desses assuntos é apresentado conforme as seções a seguir.

2.1.1 Definição e Características

Redes *ad hoc* veiculares são compostas de veículos equipados com dispositivos de comunicação sem fio, que fazem com que os veículos atuem como nós móveis, a fim de realizar algum tipo de computação, e roteadores cujo intuito é rotear e/ou encaminhar mensagens de controle e dados ao longo das redes formadas espontaneamente pelos nós móveis. Similares às redes *ad hoc* móveis, redes *ad hoc* veiculares são formadas por nós móveis, que se comunicam por meio de dispositivos de comunicação

sem fio de curto alcance, além de serem auto-organizáveis, autogerenciáveis e de largura de banda reduzida. Mesmo assim, redes *ad hoc* veiculares possuem características que as diferem das redes *ad hoc* móveis [43], que são: topologia dinâmica, desconexões frequentes da rede, disponibilidade de energia e recursos, comunicação geográfica, modelagem de mobilidade e predição, vários ambientes de comunicação, restrições severas na latência da rede e interações com sensores embarcados nos veículos. Os detalhes sobre cada uma dessas características podem ser encontradas em LI e WANG [43], SOMMER e DRESSLER [25] e GONÇALVES [42].

2.1.2 Modelos de Comunicação

Segundo ASLAM *et al.* [44], as redes *ad hoc* veiculares baseiam-se em três modelos de comunicação: comunicação veículo-a-veículo, comunicação veículo-infraestrutura e comunicação infraestrutura-infraestrutura.

No modelo de comunicação veículo-a-veículo, *broadcast/multicast multi-hop* são utilizados para transmitir dados sobre um grupo de receptores. Para que isso ocorra, veículos devem ser equipados com algum tipo de interface de comunicação sem fio ou unidade on-board (*On-Board Unit* - OBU) capazes de formar uma rede *ad hoc* veicular. Os veículos também devem ser equipados com dispositivos que permitam obter dados detalhados de posição dos mesmos, tais como receptores GPS. Em comunicação veículo-a-veículo, existem dois tipos de encaminhamento de mensagens, são eles: *broadcasting* ingênuo e *broadcasting* inteligente. Em *broadcasting* ingênuo, veículos enviam mensagens de *broadcast* periodicamente e em intervalos regulares. As limitações do método de *broadcasting* ingênuo é que um grande número de mensagens de *broadcast* é gerado, aumentando o risco de colisão de mensagens, resultando, então, em baixas taxas de entrega de mensagens, além do aumento na latência de comunicação. O *broadcasting* inteligente trata os problemas inerentes ao *broadcasting* ingênuo, limitando o número de mensagens de *broadcast*.

No modelo de comunicação veículo-infraestrutura, a comunicação é feita a partir do envio de mensagens de *broadcast* para nós que estão a um salto de distância. Dessa forma, unidades de acostamento (*Roadside Units* - RSUs) enviam mensagens de *broadcast* para veículos equipados com dispositivos de comunicação sem fio. Para tanto, unidades de acostamento podem ser posicionadas a cada quilômetro ou menos, fazendo com que altas taxas de transferência de dados sejam mantidas em condições de tráfego pesado de veículos.

No modelo de comunicação infraestrutura-infraestrutura, as unidades de acostamento podem ser conectadas às unidades localizadas em suas adjacências. A conexão entre elas pode ser por meio de cabos ou sem fio. Quando duas unidades de acostamento estão conectadas uma à outra, é dito que a comunicação entre elas é direta

[44]. No entanto, ao longo de uma rodovia, podem existir unidades de acostamento que não possuem qualquer conexão com unidades de acostamento adjacentes. Logo, para que essas unidades possam se comunicar, elas usam os veículos que estejam passando por elas como meio de estabelecer comunicações indiretas umas com as outras [44].

2.1.3 Tecnologias de Acesso à Comunicação Sem Fio

Em um ambiente de rede veicular, a escolha da tecnologia de acesso à comunicação sem fio tem um papel preponderante no que diz respeito à satisfação dos requisitos de comunicação das aplicações para redes *ad hoc* veiculares, pois a tecnologia influencia diretamente no modo como os nós devem se comunicar. Logo, tecnologias de acesso à comunicação sem fio baseadas em padrões como IEEE 802.11 [22], IEEE 802.11p [23], IEEE 802.16e [45] e 3GPP (*Third Generation Partnership Project*) formam a base de qualquer pilha de comunicação em redes que operam em ambientes veiculares.

O IEEE 802.11 é um padrão de comunicação que define as operações de redes locais sem fio. No início da pesquisa de rádios de curto alcance para comunicação interveicular, esse padrão foi amplamente utilizado no desenvolvimento de protótipos de redes *ad hoc* veiculares, devido à grande disponibilidade de dispositivos de baixo custo baseados no padrão IEEE 802.11a no mercado [25]. As redes formadas por dispositivos baseados no padrão IEEE 802.11 conseguem fornecer altas taxas de transferência de dados dentro de um alcance relativamente curto [46].

O IEEE 802.11p é um novo padrão de comunicação sem fio, sendo ele pertencente à família de padrões IEEE 802.11. Este padrão tem como objetivo fornecer acesso à comunicação sem fio em ambientes exclusivamente veiculares. O IEEE 802.11p foi criado a partir de melhorias feitas no padrão IEEE 802.11a, de modo que este último pudesse ser utilizado em aplicações de sistemas inteligentes de transporte. De acordo com MENOVAR *et al.* [47], tais melhorias advêm dos conceitos de segurança veicular ativa e dos requisitos de comunicação das categorias de aplicações para redes *ad hoc* veiculares. Com dispositivos de comunicação sem fio baseados em IEEE 802.11p, nós de rede são capazes de transmitir dados com taxas de transferência variando entre 6 a 27 Mbps, desde que os mesmos estejam a uma distância máxima de 1000m uns dos outros.

O IEEE 802.11e é o padrão de acesso à comunicação sem fio de banda larga móvel do WiMax e permite a convergência de redes de banda larga móveis e fixas. Ele tem como características: altas taxas de transferência de dados e inclusão de técnicas MIMO (Multiple Input Multiple Output) com antenas, usando tecnologia de diversidade espacial em conjunto com esquemas de subcanalização, codificação e modulação, que permitem alcançar taxas de transferência de dados entre 28 e 63

Mbps por setor. A mobilidade do IEEE 802.16e suporta velocidades superiores a 160 km/h, além de fornecer esquemas otimizados de *handover* com latências menores que 50ms, para satisfazer requisitos de tempo real. O padrão também adota diferentes possibilidades de faixas de frequência entre 1,25 a 20 MHz. Isso permite que o padrão se adapte às diferentes realidades mundiais de alocação de frequências.

O padrão 3GPP é uma família de padrões relacionados às tecnologias de acesso à comunicação sem fio para redes celulares [25], tais como: GSM (*Global System for Mobile Communication*), UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*) e LTE (*Long Term Evolution*). Tradicionalmente, redes celulares baseadas no padrão GSM são chamadas de redes celulares de segunda geração (2G), pois elas sucederam os sistemas celulares analógicos. Uma vez que o padrão UMTS substituiu o GSM, redes celulares baseadas no padrão UMTS são chamadas de redes celulares de terceira geração (3G). Por fim, redes celulares baseadas no padrão LTE têm sido chamadas de redes celulares de quarta ou quinta geração (4/5G). Embora cada um dos padrões para redes celulares represente uma evolução tecnológica, o conceito principal em torno das redes celulares é o mesmo. Sendo assim, uma ampla área de geográfica é coberta por uma rede de estações base, em que cada uma serve uma parte desta área, que é uma célula. Nessa rede, um dispositivo se conecta a uma estação base que serve a célula em que ele se encontra. O dispositivo sempre muda para a estação base mais apropriada, à medida que ele se move em direção aos limites de uma célula. Devido às suas características, o padrão LTE tem sido visto como o padrão tecnológico proeminente, no que tange ao fornecimento tanto de comunicação veículo-infraestrutura quanto comunicação infraestrutura-infraestrutura, quando se trata da disponibilização de redes veiculares, pois redes celulares LTE são capazes de transferir dados com taxas de transferência de dados entre 50 e 100 Mbps [24]. Tal rede é capaz de suportar nós que se movem até 350 km/h [24]. Por fim, as redes LTE são capazes de fornecer alta capacidade com ampla cobertura. Neste caso, o padrão LTE pode suportar até 1200 veículos por célula em ambientes rurais com um delay abaixo de 55ms.

2.2 Fundamentos de Engenharia de Tráfego

Este capítulo tem como objetivo apresentar o levantamento bibliográfico do referencial teórico acerca da estrutura de rede de tráfego, assim como o referencial teórico relacionado aos parâmetros microscópicos e macroscópicos de tráfego, diagrama fundamental do fluxo de tráfego e controle de tráfego por meio de sinalização semafórica. Com relação à seção sobre estrutura de rede de tráfego, o texto tem como base no Código de Trânsito Brasileiro [48]. No que tange ao referencial teórico de parâmetros microscópico e macroscópico de tráfego, o texto tem como base a

primeira seção do segundo capítulo do livro de CHOWDHURY e SADEK [49]. O referencial teórico a respeito do diagrama fundamental do fluxo de tráfego teve como base o texto da segunda seção do capítulo seis do livro de GARBER e HOEL [50]. Por fim, o referencial teórico acerca do controle de tráfego por meio de sinalizações semaforizadas teve como base documentações do DENATRAN [51] e da quarta seção do segundo capítulo do livro de CHOWDHURY e SADEK [49].

2.2.1 Estrutura de Rede de Tráfego

Cada autoridade de tráfego tem nomes particulares para os vários tipos de conexões, mas uma hierarquia amplamente aceita é baseada em suas capacidades e funções. A respeito da capacidade, as vias são organizadas, de modo que o fluxo de tráfego escoe de uma via de menor capacidade para uma via de maior capacidade. Neste sentido, vias locais escoam o fluxo de tráfego para vias coletoras, que escoam o seu fluxo de tráfego para vias arteriais, que, por fim, escoam o seu fluxo para vias de trânsito rápido. As vias locais são aquelas caracterizadas por interseções em nível não semaforizadas, destinada apenas ao acesso local ou a áreas restritas. As vias coletoras são aquelas destinadas a coletar e distribuir o trânsito que tenha necessidade de entrar ou sair das vias de trânsito rápido ou arteriais, possibilitando o trânsito dentro das regiões da cidade. As vias arteriais são aquelas caracterizadas por interseções em nível, geralmente controlada por semáforo, com acessibilidade aos lotes lindeiros e às vias secundárias e locais, possibilitando o trânsito entre as regiões da cidade. Por fim, as vias de trânsito rápido são aquelas caracterizadas por acessos especiais com trânsito livre, sem interseções em nível, sem acessibilidade direta aos lotes lindeiros e sem travessia de pedestres em nível. Com base nestas definições de vias, é possível perceber uma relação entre os níveis de acessibilidade e mobilidade. Uma via local fornece alta acessibilidade, mas possui baixa mobilidade. Diferentemente, uma via de trânsito rápido tem acesso muito limitado, mas possui alta mobilidade.

2.2.2 Parâmetros Macroscópicos e Microscópicos de Tráfego

Como mencionado anteriormente, descrever fluxos de tráfego envolve uma série de parâmetros que podem ser macroscópicos ou microscópicos. Neste sentido, três parâmetros básicos são utilizados para descrever fluxos de tráfego: fluxo, velocidade e densidade.

O fluxo (q) é um parâmetro macroscópico de tráfego, que é o número de veículos passando em um determinado ponto de uma via durante um determinado período de tempo de, geralmente, uma hora. O fluxo é frequentemente expressado em veículos por hora. Um parâmetro importante derivado do fluxo é o valor de fluxo máximo,

que é frequentemente referenciado como a capacidade (q_m) de uma via. O fluxo pode ser determinado por:

$$q = \frac{n \times 3600}{T} \quad (2.1)$$

onde n é o número de veículos passando em um determinado ponto de uma via em T segundos.

A velocidade claramente é um parâmetro microscópico de cada veículo. Assim, um valor de velocidade média (\bar{u}) pode ser associado a um fluxo de tráfego, fazendo com que a velocidade se torne um parâmetro macroscópico na perspectiva de um fluxo de tráfego. A velocidade média horária (\bar{u}_t) é a média aritmética das velocidades dos veículos passando em um determinado ponto de uma via durante um período de tempo. A velocidade média horária é frequentemente expressada em milhas por hora (nos Estados Unidos), quilômetros por hora, metros por segundo ou pés por segundo. Essa velocidade é calculada a partir de:

$$\bar{u}_t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i \quad (2.2)$$

onde n é o número de veículos passando em um determinado ponto de uma via, e u_i é a velocidade do i -ésimo veículo. A velocidade média espacial (\bar{u}_s) é a média harmônica das velocidades dos veículos passando em um determinado ponto de uma via durante um período de tempo. Ela é obtida a partir da divisão da distância total viajada por dois ou mais veículos pelo tempo gasto por estes veículos para viajar esta distância. Esta é a velocidade que está envolvida nos relacionamentos entre fluxo e densidade. A velocidade média espacial é calculada a partir de

$$\bar{u}_s = \frac{nL}{\sum_{i=1}^n t_i} \quad (2.3)$$

onde n é o número de veículos passando em um determinado ponto de uma via, t_i é o tempo que o i -ésimo veículo leva para viajar através de seção de via, e L é o tamanho da seção de via. A velocidade média horária é sempre maior que a velocidade média espacial. A diferença entre estas velocidades tende a diminuir, à medida que os valores absolutos de velocidades aumentam.

A densidade (k) é um parâmetro macroscópico de tráfego, que pode ser definido como o número de veículos presentes sobre uma unidade de tamanho de uma via em um determinado instante no tempo. A densidade é tipicamente expressada em veículos por milha (nos Estados Unidos) ou veículos por quilômetro. Existem dois parâmetros importantes derivados a partir da densidade: a densidade de congestionamento (k_j) e a densidade ótima (k_o). A densidade de congestionamento ocorre sob condições extremas de congestionamento, quando o fluxo e a velocidade do tráfego

se aproximam de zero. A densidade ótima ocorre sob condições de fluxo máximo.

A densidade está também relacionada a dois parâmetros microscópicos de tráfego, que são: o intervalo de tempo entre veículos (*headway*) e o espaçamento entre veículos (*gap*). O intervalo de tempo entre veículos (h) é definido como a diferença de tempo entre o momento em que a frente de um veículo chega em um determinado ponto de uma via e o momento em que a frente do próximo veículo atinge o mesmo ponto da via. Este parâmetro é tipicamente expresso em segundos. O espaçamento entre veículos (d) é definido como a distância entre a frente de um veículo e a frente do veículo imediatamente atrás. Esse parâmetro é tipicamente expresso em metros.

2.2.3 Diagrama Fundamental de Fluxo de Tráfego

A teoria de fluxo de tráfego tem como base o relacionamento entre os parâmetros macroscópicos apresentados na seção anterior, que são: fluxo (q), densidade (k) e velocidade média espacial \bar{u}_s . Essa relação se dá a partir de:

$$q = k \times \bar{u} \quad (2.4)$$

Com base no relacionamento entre a densidade e o fluxo (veja Figura 2.1), as seguintes hipóteses podem ser feitas acerca deste relacionamento:

1. Quando a densidade é zero, o fluxo também é zero, pois não existem veículos na via;
2. Quando a densidade cresce, o fluxo também cresce, pois a quantidade de veículos trafegando na via também aumenta;
3. Quando a densidade atingir o seu valor máximo (densidade de engarrafamento, k_j), o fluxo deve ser zero, uma vez que os veículos se encontram parados na via;
4. Baseando-se em 2 e 3, conclui-se que, à medida em que a densidade cresce, o fluxo inicialmente cresce até atingir um valor máximo. Aumentos adicionais na densidade levam a redução do fluxo, que poderá chegar a zero, caso a densidade atinja o seu valor máximo.

O diagrama fundamental de fluxo de tráfego é usado para caracterizar diferentes regimes de fluxo. No regime de fluxo livre, cada veículo viaja na velocidade desejada do motorista. Esse fluxo ocorre quando poucos veículos estão na via e existem faixas

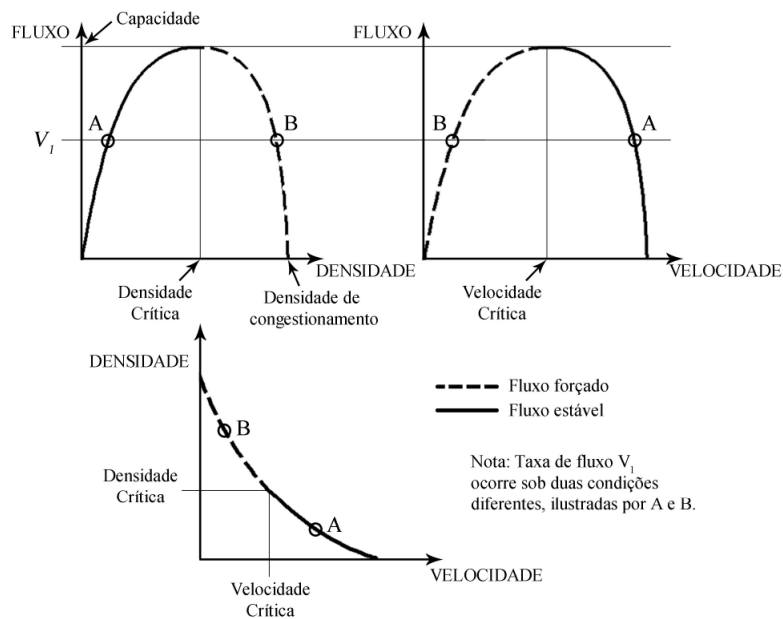


Figura 2.1: Diagrama fundamental de fluxo de tráfego. As partes tracejadas dos gráficos representam o regime de congestionamento. Os pontos de transição em cada curva são a densidade crítica e velocidade crítica. Fonte: [1].

suficientes para permitir ultrapassagens sem qualquer atraso. Além disso, a velocidade nesse regime de tráfego é denotada por \bar{u}_f . Com o aumento na densidade de veículos, os motoristas começam a ter dificuldades de manter suas velocidades desejadas, devido a uma redução de velocidade causado por veículos mais lentos à frente de seus veículos. Isso resulta em uma diminuição contínua da velocidade média. Por isso, este regime é chamado de parcialmente restrito, pois nem todos os veículos conseguem se mover na velocidade desejada por seus motoristas e, tão pouco, realizar ultrapassagens. Quando as ultrapassagens não são possíveis, os veículos começam a viajar em pelotões cuja velocidade é determinada pelos veículos à frente destes. Neste caso, é dito que o regime de fluxo é restrito. A transição do regime de tráfego parcialmente restrito para o restrito é claramente observada no relacionamento entre velocidade e fluxo (ver Figura 2.1). Essa transição ocorre no ponto de máximo da curva em que o diagrama fundamental apresenta o relacionamento entre o fluxo e a velocidade. A velocidade neste ponto é denotada por \bar{u}_o , uma vez que a via está sob condições de fluxo máximo.

O relacionamento densidade-velocidade reflete o comportamento dos motoristas, pois estes ajustam as velocidades de seus veículos a partir da percepção da proximidade de outros veículos e seus conceitos sobre segurança em determinadas condições de tráfego. Dessa forma, a densidade é criada a partir do ajuste da velocidade do veículo de cada um dos motoristas na via.

2.2.4 Controle de Tráfego por meio de Sinalizações Semafóricas

Quando se aborda o problema de controle de tráfego, é comum o uso de sinalizações semafóricas como mecanismo de controle de tráfego. De acordo com [51], a sinalização semafórica é um subsistema da sinalização viária que é composto de indicações luminosas acionadas alternada ou intermitentemente por meio de um sistema eletromecânico ou eletrônico (controlador). Esse tipo de sinalização tem como objetivo transmitir diferentes mensagens aos usuários das vias, regulando o direito de passagem ou advertindo sobre condições especiais nas vias [51]. Em situações específicas, tais como o uso de dispositivos de detecção do tráfego, equipamentos de fiscalização não metrológico e centrais de controle podem ser associados à sinalização semafórica [51]. Por fim, a operação da sinalização semafórica deve ser contínua e criteriosamente avaliada quanto à sua real necessidade e adequação de sua programação [51].

Toda sinalização semafórica tem seu funcionamento baseado em um ciclo composto de três indicações: SIGA, ATENÇÃO e PARE. Cada uma dessas três indicações é representada por uma luz de cor específica. A luz verde representa a indicação SIGA. Nessa indicação, veículos podem atravessar a interseção. A luz amarela representa a indicação ATENÇÃO. Nessa indicação, os motoristas devem reduzir a velocidade de seus veículos, de modo que possam se preparar para uma parada antes da faixa de contenção pintada sobre as vias de entrada de uma interseção. Por fim, a luz vermelha representa a indicação PARE. Cada uma dessas indicações tem um tempo de duração, que ajuda a definir o início e o fim de uma indicação ao longo do tempo. Dessa forma, se as luzes das sinalizações semafóricas estão verdes ou amarelas para as vias de entrada de uma interseção, então, as luzes vermelhas das sinalizações semafóricas sobre as vias com movimentos conflitantes aos das vias entrada devem estar acesas. Essa regra de segurança tem como objetivo evitar que veículos atrevessem uma interseção ao mesmo tempo. Além dessa regra de segurança, também existem as de igualdade cujo intuito é distribuir de maneira justa os tempos das fases das sinalizações semafóricas que controlam as vias de entrada de uma interseção. Portanto, para todas essas vias, deve ser fornecido um tempo mínimo de duração para a indicação SIGA. No que tange à indicação ATENÇÃO, esta tem um tempo fixo de duração.

Existem termos que são comumente utilizados em controle de tráfego por meio de sinalizações semafóricas, são eles: fase, intervalo, ciclo, tamanho do ciclo [49], movimento e grupos de movimento [2].

A fase é o tempo em que um conjunto de movimentos de tráfego recebe o direito de atravessar a interseção. O intervalo é o tempo em que as indicações de uma

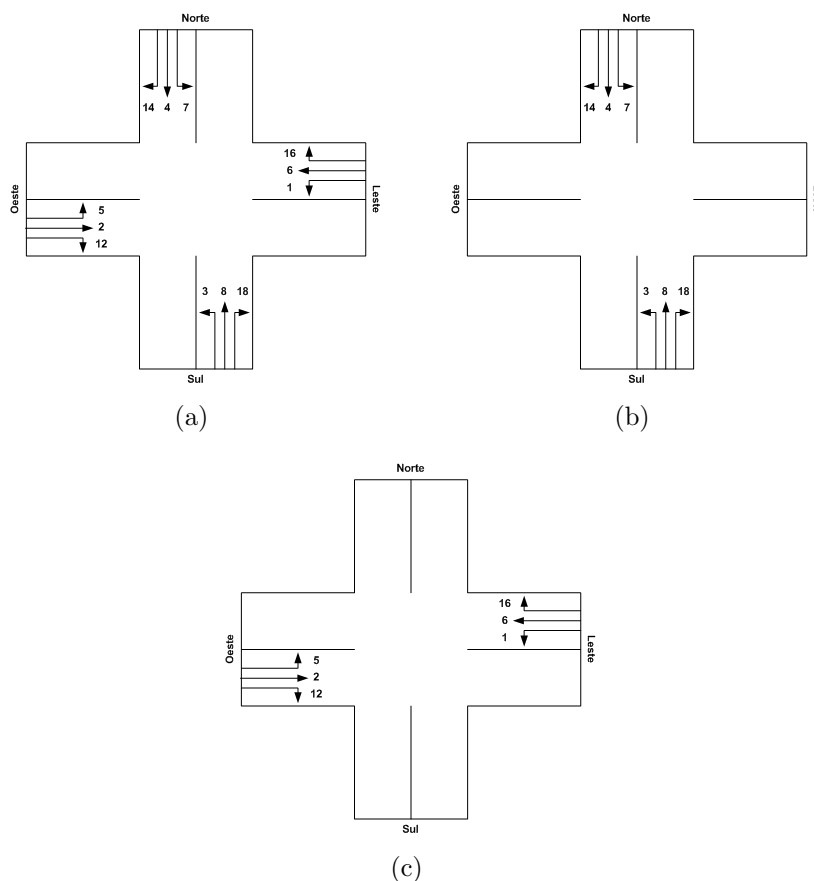


Figura 2.2: Exemplo de uma interseção com movimentos e grupos de movimentos identificados: (a) Enumeração de movimentos em uma interseção sinalizada; (b) Grupo de movimentos norte-sul-norte; (c) Grupo de movimentos leste-oeste-leste. Fonte: KYTE e TRIBELHORN [2].

sinalização semafórica se mantêm constantes. O ciclo é uma sequência completa de indicações de uma sinalização semafórica até que uma nova sequência seja iniciada. O tamanho do ciclo é o tempo que uma sinalização semafórica leva para exibir uma sequência completa de indicações. O intervalo é o tempo em que as indicações das sinalizações semafóricas se mantêm constantes. Um ciclo inclui vários intervalos para as indicações de uma sinalização semafórica, ou seja, intervalos para indicações das luzes verde, amarela e vermelha. O movimento é definido pela direção do fluxo de tráfego e a manobra que cada veículo precisa realizar em uma interseção. Em uma interseção sinalizada, os movimentos são identificados por meio de números, como pode ser visto na Figura 2.2(a). Neste caso, movimentos que viram à esquerda são enumerados com números ímpares (veja Figura 2.2(a)). Para movimentos que atravessam a interseção, utiliza-se uma enumeração com números pares (veja Figura 2.2(a)). No que diz respeito aos movimentos que viram à direita, utiliza-se o mesmo número do movimento compatível que atravessa a interseção ou este número antecedido pelo dígito 1 (veja Figura 2.2(a)). Os movimentos são classificados, de acordo

com as restrições impostas a eles, a saber: movimento sem oposição, movimento protegido, movimento permitido e movimento proibido. O movimento sem oposição é aquele que nenhum outro movimento se opõe a ele. O movimento protegido é aquele que pode ter um movimento oposto a ele, mas a indicação da sinalização dá a este movimento o direito de passagem. O movimento permitido é aquele em que é permitido trafegar através de uma interseção, mas deve dar direito de passagem, se um movimento oposto de maior prioridade existir. Por fim, o movimento não permitido é aquele em que um fluxo de veículos é totalmente proibido de trafegar ou tem tráfego proibido em certos períodos do dia. Os grupos de movimentos são classificados em compatíveis ou conflitantes. Em geral, movimentos norte-sul/sul-norte conflitam com movimentos leste-oeste/oeste-leste (veja Figura 2.2(a)). Os movimentos norte-sul e sul-norte são parte de um grupo chamado de grupo de concorrência, como pode ser visto na Figura 2.2(b), pois esses movimentos podem trafegar concorrentemente pela interseção. O mesmo se aplica aos movimentos Leste-Oeste e Oeste-Leste, como pode ser visto na Figura 2.2(c). Por fim, de acordo com o plano de fases da sinalização semafórica e restrições nos movimentos, um movimento no grupo de concorrência Norte-Sul-Norte pode ser servido ao mesmo tempo que qualquer movimento do mesmo grupo. Este conceito se aplica aos movimentos do grupo Leste-Oeste-Leste.

As sinalizações semafóricas podem operar em quatro diferentes modos, a saber: pré-temporizado, semiatuado, totalmente atuado e baseado em computadores [49]. No modo de operação pré-temporizado, o tamanho do ciclo, intervalos e fases são pré-definidos ou fixos e, por isso, não são sensíveis às variações do volume de tráfego. O modo de operação semiatuado é utilizado em interseções onde uma via com volume maior e outra com volume menor são claramente identificadas. Nesse caso, os detectores de tráfego são utilizados somente na via de menor volume. Desta forma, a sinalização semafórica da via com maior volume de tráfego mantém a luz verde acesa até o momento em que veículos sejam detectados na via de menor volume. Quando isso acontece, após a sinalização semafórica da via com maior volume ter permanecido um tempo mínimo com a luz verde acesa, a sinalização semafórica da via com menor volume pode ter sua luz verde acesa. No modo de operação totalmente atuado, é necessário que todas as vias tenham detectores de tráfego. Com isso, o tempo em que a luz verde permanece acesa nas sinalizações semafóricas pode ser alocado de acordo com o volume de tráfego observado em cada via de entrada da interseção. Por fim, o modo de operação baseado em computador refere-se ao uso de um computador para ligar a operação de um grupo de interseções sinalizadas na forma de um sistema coordenado. Assim, o computador seleciona ou computa planos ótimos de sinalizações semafóricas coordenadas para todo o sistema, baseando-se nas informações de tráfego fornecidas pelos detectores de tráfego instalados nas vias.

Uma sinalização semafórica pode ser responsável pelo controle de uma interseção isolada, que é uma interseção que opera a parte de um sistema coordenado de sinalizações semafóricas. Um sistema coordenado de sinalizações semafóricas é um grupo de sinalizações semafóricas que têm seus intervalos indicações de luzes verdes sincronizados, de modo que os veículos não precisem parar em cada uma interseção controlada por uma das sinalizações semafóricas deste sistema. Sistemas coordenados de sinalizações semafóricas são utilizados quando as sinalizações semafóricas estão relativamente próximas umas das outras e formam um corredor. Nesse tipo de sistema, as sinalizações semafóricas devem ter o mesmo tamanho de ciclo. Para sincronizar os intervalos de verde, sistemas coordenados de sinalizações semafóricas fazem uso de um termo chamado de *offset*. O *offset* é a diferença de tempo entre o início do intervalo de luz verde entre duas interseções vizinhas.

Capítulo 3

Redes Veiculares Centradas em Interesses

Esse capítulo apresenta as duas primeiras contribuições desta tese, que são a Rede *Ad Hoc* Veicular Centrada em Interesses [39, 52] e a Rede *Ad Hoc* Veicular Heterogênea Centrada em Interesses.

3.1 Rede *Ad Hoc* Veicular Centrada em Interesses

Entender os requisitos de comunicação das categorias de aplicações para redes *ad hoc* veiculares é fundamental para projetar um protocolo de comunicação eficiente. Neste sentido, inicialmente, essa seção apresenta como o projeto da Rede *Ad Hoc* Veicular Centrada em Interesses[39, 52] ou RAdNet-VE (*InteRest-Centric Mobile Ad Hoc Network for Vehicular Environments*) trata tais requisitos. Em seguida, é descrito como o projeto da RAdNet-VE estendeu o cabeçalho de mensagens da RAdNet (*InteRest-Centric Mobile Ad Hoc Network*).

3.1.1 Tratando os Requisitos de Comunicação das Categorias de Aplicações para Redes *Ad Hoc* Veiculares

Os projetos de protocolos de comunicação para redes *ad hoc* veiculares devem levar em conta os requisitos de latência, confiabilidade e escala. Além disso, o escopo de comunicação e serviços de comunicação de membros de grupos também devem ser bem definidos, a fim de satisfazer os requisitos de comunicação das categorias de aplicação para redes *ad hoc* veiculares [38]. Portanto, a RAdNet-VE herda características da RAdNet [40, 53] e, além disso, adota mecanismos e abordagens descritas a seguir.

Quando uma aplicação precisa se comunicar com baixa latência, o protocolo de comunicação deve ser capaz de fornecer comunicação fim-a-fim com baixo *delay* [38]. Neste sentido, a RAdNet-VE deve fornecer baixa latência, pois ela não sofre com o dinamismo das redes *ad hoc* veiculares. Na RAdNet-VE, os nós não precisarão de informações a respeito da topologia de rede, pois eles não precisarão encontrar, manter e atualizar rotas para outros nós na rede. Conseqüentemente, a largura de banda, normalmente ocupada por mensagens de controle, deverá ser liberada. Na RAdNet, o uso de prefixos como um conjunto de valores probabilísticos permite que mensagens sejam encaminhadas, de acordo com a distribuição de probabilidade usada para construir os prefixos. Dessa forma, os nós não precisam determinar o melhor caminho entre a origem e o destino de uma mensagem. O mecanismo adotado pela RAdNet permite que os veículos troquem mensagens por múltiplos caminhos.

As aplicações necessitam de um protocolo, que possa entregar mensagens a um grupo de nós. Esse protocolo deve assegurar uma alta probabilidade de entrega de mensagens [38]. Como nos nós da RAdNet, os nós da RAdNet-VE devem armazenar o identificador e o prefixo de origem das mensagens, a fim de compará-los com os de mensagens recebidas. Isso permite que mensagens já recebidas pelos nós não sejam encaminhadas. No entanto, isso não é suficiente para assegurar altas taxas de entrega de mensagens na RAdNet-VE, pois ambientes veiculares são caracterizados por serem ambientes com alta densidade de veículos. Assim, quando os veículos na mesma vizinhança recebem uma mensagem, eles a encaminham para todos os nós vizinhos, de acordo com um filtro de casamento de dados da RAdNet, causando um overhead desnecessário. Para evitar isto, o mecanismo de encaminhamento de mensagens da RAdNet deve ser estendido, adicionando campos ao cabeçalho original de mensagem da RAdNet. Estes campos devem armazenar a posição relativa da origem da mensagem e identificador de via. Além disso, devem ser levados em consideração o uso de dispositivos GPS em cada nó da RAdNet-VE e o acesso a bancos de dados de mapas por parte das aplicações para redes *ad hoc* veiculares.

Portanto, quando um nó receber uma mensagem, ele pode calcular a distância relativa entre ele e a origem da mensagem recebida, além de poder armazenar tanto o prefixo quanto a posição relativa da origem da mensagem recebida. É importante pontuar que, os nós devem armazenar somente os prefixos e posições relativas de seus vizinhos, que são aqueles nós a um salto de distância. Uma vez que os nós passam a conhecer as posições relativas de seus vizinhos, aqueles que são os nós mais distantes da origem de uma mensagem, eles devem encaminhar as mensagens recebidas ou devem atuar passivamente e não encaminhar mensagens, se estes não obedecerem essa restrição. Além disso, o encaminhamento de mensagens deve acontecer entre nós que estejam na mesma via cujo identificador seja igual ao do campo identificador de via da mensagem recebida. A adição dessas restrições ao mecanismo

de encaminhamento de mensagens deve permitir que as mensagens sejam entregues a muitos nós, usando poucos saltos, assim como deve fornecer baixa latência de comunicação entre os nós.

O uso de posições relativas no encaminhamento de mensagens sobre longas distâncias deve permitir que o protocolo de comunicação escale apropriadamente em ambientes veiculares com alta densidade [38]. No entanto, algumas aplicações para redes *ad hoc* veiculares precisam propagar mensagens em uma determinada direção. Embora os nós da RAdNet possam encaminhar mensagens sobre longas distâncias, usando muitos saltos, o mecanismo de encaminhamento de mensagens da RAdNet não satisfaz tal requisito, pois ela foi projetada para satisfazer os requisitos de aplicações para rede *ad hoc* móveis. Isto, portanto, torna necessária a adição de um campo direção ao cabeçalho de mensagens da RAdNet. Esse campo deve admitir somente os seguintes valores:

- **-1:** mensagens podem ser encaminhadas somente na direção oposta à do nó, à medida que esse se move;
- **0:** mensagens podem ser encaminhadas em todas as direções;
- **1:** mensagens podem ser encaminhadas somente na mesma direção que a do nó.

A adição do campo direção no cabeçalho de mensagem da RAdNet permite que o fluxo de encaminhamento de mensagens seja unidirecional ou bidirecional. Portanto, o mecanismo de encaminhamento de mensagens deve ser estendido, adicionando mais uma restrição, a fim de permitir que os nós encaminhem mensagens, de acordo com a direção em que eles se movem. Então, ao receber uma mensagem, o nó deve usar o campo de posição relativa para calcular seu posicionamento na via em relação à origem da mensagem. Uma vez que cada nó possui seu próprio dispositivo GPS, ele deve ser capaz de obter o seu posicionamento atual em relação aos nós que trafegam em uma via. Em outras palavras, os nós devem ser capazes de saber se eles estão atrás ou à frente da origem de uma mensagem. Então, para representar o posicionamento dos nós, adota-se o valor -1, quando o nó estiver atrás da origem da mensagem, ou 1, quando ele estiver à frente desta. Dessa forma, ao receber uma mensagem cuja origem está à frente e o valor do campo direção é igual a -1, o nó deve ser capaz de encaminhar a mensagem para seus vizinhos, senão, ele deve descartar a mensagem. Por outro lado, ao receber uma mensagem de uma origem que está atrás e o valor do campo direção é 1, o nó deve ser capaz de encaminhar essa mensagem para os seus vizinhos, caso contrário, ele deve descartar a mensagem. Os nós devem encaminhar mensagens se o identificador de via da mensagem recebida corresponde a via em que eles estão operando.

As aplicações relacionadas ao controle de movimento individual ou em grupo operam em um escopo de comunicação bem definido, que pode ser uma vizinhança de veículos ou uma região pequena na rede [38]. Portanto, os protocolos de comunicação devem assegurar a entrega seletiva de mensagens, que podem ser baseadas em trajetória, proximidade de veículo ou identificação de veículo. Na RAdNet, os nós não precisam manter ou atualizar rotas, mas eles podem encaminhar mensagens até um número máximo de saltos, de acordo com o resultado do filtro de casamento de dados [40, 53]. No entanto, tal comportamento não permite que aplicações de controle de movimentos individuais de veículos ou de grupos de veículos troquem mensagens dentro de um escopo bem definido de comunicação, pois o protocolo de comunicação da RAdNet leva em consideração um único valor de número máximo de saltos para encaminhar mensagens. Por isto, o mecanismo de registro de interesses deve ser estendido, assim como o mecanismo de encaminhamento de mensagens. Neste sentido, deve se fazer uso do campo identificador de via, a fim de limitar o escopo de comunicação na via em que os nós estejam operando. Na RAdNet-VE, as aplicações para redes *ad hoc* veiculares devem registrar seus interesses com seus respectivos números máximos de saltos. Com isto, o escopo de comunicação se torna restrito, de acordo com os números máximos de saltos registrados com os interesses e as vias em que os nós estejam operando.

A respeito de serviços de membros de grupos, as aplicações relacionadas ao controle de movimentos individuais ou de grupos precisam de um protocolo que possibilite a manutenção de estruturas de grupos persistentes. Uma vez que a RAdNet-VE é uma rede centrada em informações, ela não leva em consideração espaços de endereçamento de grupos ou mecanismos centralizados ou distribuídos para gerenciamento de membros de grupos, assim como a RAdNet, a RAdNet-VE é baseada no modelo de comunicação *Publisher/Subscriber* [54]. Portanto, usando o mecanismo de interesses contidos nas mensagens, serviços para membros de grupos devem ser implementados de maneira completamente distribuída.

Com base em todas essas propostas de mecanismos e abordagens para satisfazer os requisitos de comunicação das categorias de aplicações para redes *ad hoc* veiculares, as seções seguintes descrevem como se deram as extensões das estruturas de dados e mecanismos da RAdNet, tais como: prefixo ativo, cabeçalho de mensagens, mecanismo de encaminhamento de mensagens e mecanismo de registro de interesses.

3.1.2 Descrição das Extensões das Estruturas de Dados e Mecanismos da RAdNet

A proposta da RAdNet-VE estende certas estruturas de dados e mecanismos da RAdNet. No que tange às estruturas de dados, a proposta da RAdNet-VE altera os

tamanhos dos campos do Prefixo Ativo, assim como estende e modifica os tamanhos dos campos do cabeçalho de mensagens da RAdNet. No projeto da RAdNet, os campos prefixo do nó e interesse têm tamanhos de 24 bits. Devido às modificações dos tamanhos dos campos do cabeçalho de mensagens da RAdNet, os tamanhos dos campos prefixo do nó e interesse aumentaram de 24 bits para 32 bits.

Acerca das alterações de tamanho de alguns campos do cabeçalho de mensagem da RAdNet e extensões do mesmo, ambas procederam como segue:

- Um aumento de 24 bits para 32 bits no tamanho dos seguintes campos do cabeçalho de mensagens da RAdNet: identificador de mensagem, prefixo de destino, prefixo de origem e interesse. A decisão de aumentar os tamanhos desses campos teve como objetivo padronizá-los com tamanhos cujos valores são de base dois.
- A adição de três campos ao cabeçalho de mensagem da RAdNet: posição relativa da origem de mensagem (96 bits), direção de encaminhamento de mensagens (8 bits) e o identificador de via (32 bits). Nesta tese, assume-se que todos os nós são equipados com dispositivos GPS e que as aplicações que executam sobre estes nós podem acessar bancos de dados de mapas, tais como Open Street Maps e Google Maps. Além disso, a posição relativa da origem da mensagem deve armazenar três valores de 32 bits que são: longitude, latitude e altitude.

No que diz respeito às extensões dos mecanismos da RAdNet, essas procederam da seguinte forma:

- **Registro dos interesses com seus respectivos números máximos de saltos na camada de rede do nó:** Esta extensão apenas realiza um mapeamento entre um interesse e um número máximo de saltos. É importante salientar que um interesse só pode mapear um e somente um número máximo de saltos. No entanto, isso não impede que as aplicações para redes *ad hoc* veiculares possam usar uma mesma identificação de interesse. Para resolver esse problema, recomenda-se especificar os interesses usando a seguinte estrutura: *radnet-ve://user service bundle/user service/application name/interest*, tal que *user bundle* é um agrupamento lógico de serviços de sistemas inteligentes de transporte, *user service* é o tipo de serviço de usuário de sistema inteligente de transporte, *application name* é o nome da aplicação pertencente ao tipo de serviço de usuário de sistemas inteligentes de transporte e, por fim, *interest* é o interesse no qual a aplicação é uma subscritora. Os componentes dessa URI se baseiam na especificação da *National ITS Architecture 7.1* do *United States Department of Transportation* [55]. Com base nessa estrutura é

possível não somente identificar os interesses por aplicações, mas, também é possível identificar unicamente as aplicações instaladas nos nós. Portanto, um interesse pode ser identificado de acordo com a seguinte URI, por exemplo: *radnet://avss/safety_readiness/obstacle_notifier/obstacle_on_road*. Por fim, o mecanismo de registro de interesses deve ser capaz de manter em memória os interesses mais utilizados, à medida que os nós se comunicam uns com os outros. Isso deve permitir que muitos interesses sejam registrados na camada de rede do nó. No entanto, somente os mais utilizados são mantidos em memória, a fim de facilitar a consulta por interesses, nos quais os nós são subscritores. Para tanto, o mecanismo de registro de interesses deve ser implementado, levando em consideração um algoritmo MFU (*Most Frequently Used*).

- **Adição de novas regras de filtragem ao mecanismo de encaminhamento de mensagens:** é importante pontuar que, a adição dessas novas regras não afeta as que foram herdadas do protocolo de comunicação da RAdNet.

Com base nas extensões descritas acima, foi possível iniciar o projeto do protocolo de comunicação da RAdNet-VE. Pretende-se, com esse protocolo, encaminhar mensagens, levando em conta os seguintes dados: (I) O identificador da via em que os nós (veículos e unidades de acostamento) estejam operando; (II) O resultado do casamento de dados entre o prefixo do nó e o prefixo da origem da mensagem; (III) O resultado do casamento de dados entre os interesses registrados nos nós e aqueles contidos nas mensagens; (IV) A distância entre um nó e a origem da mensagem; (V) O posicionamento do nó em relação à origem da mensagem; (VI) O número máximo de saltos registrado juntamente com o interesse na camada de rede do nó ou um número máximo de saltos padrão, que somente é usado se os interesses contidos nas mensagens não existirem no registro de interesses na camada de rede do nó.

A próxima seção tem como objetivo descrever os detalhes do projeto do protocolo de comunicação da RAdNet-VE, cujo nome é o seguinte acrônimo: RVEP (*RAdNet-VE Protocol*).

3.1.3 Projeto do Protocolo de Comunicação da RAdNet-VE

Na RAdNet-VE, todos os nós devem ser inicializados, antes que eles possam transmitir mensagens. Portanto, durante o processo de inicialização do nó, as seguintes variáveis de controle e estruturas de dados são inicializadas: contador de mensagens enviadas, prefixo do nó, tabela de prefixos de origem e mensagens recebidas, tabela de interesses e números máximos de saltos, tabela de posições relativas de vizinhos dentro da área coberta pelo rádio de comunicação e lista de identificadores de vias.

Seguindo com o processo de inicialização, o nó registra os interesses das aplicações com seus respectivos números máximos de saltos. Por fim, a configuração da lista de identificadores de via depende das aplicações instaladas no nó e de como elas lidam com as características das vias onde o nó esteja operando. Portanto, as aplicações precisam registrar os identificadores de vias na camada de rede do nó.

A identificação deve seguir a seguinte estrutura: *radnet-ve://user service bundle/user service/application name/roadway identifier/lane*, tal que *roadway identifier* é o identificador único da via em que o nó está operando, que é obtido por meio de um banco de dados de mapas pela aplicação; e *lane* é a faixa da via, caso haja a necessidade de diferenciar as faixas da via, a fim de estabelecer a comunicação entre os nós. Portanto, uma via pode ser identificada de acordo com a seguinte URI, por exemplo: *radnet://avss/safety_readiness/obstacle_notifier/Rod.+Gov.+Mario+Covas*. Caso seja necessário identificar as faixas de uma via com duas faixas, essas podem ser identificadas de acordo com as seguintes URIs, por exemplo: *radnet://avss/safety_readiness/obstacle_notifier/Rod.+Gov.+Mario+Covas/0*, para a faixa da direita, e *radnet://avss/safety_readiness/obstacle_notifier/Rod.+Gov.+Mario+Covas/1*, para a faixa da esquerda.

Se uma aplicação instalada em uma unidade de acostamento é responsável em notificar veículos sobre obstáculos em uma rodovia, a lista de identificadores pode conter uma entrada. Embora a via tenha mais de uma faixa, pretende-se notificar todos os veículos, independente das faixas em que eles estejam trafegando. Um outro exemplo pode ser uma aplicação responsável em controlar as sinalizações semaforicas de uma interseção complexa, semelhante a apresentada na Figura 2.2(a) desta tese. Nesse caso, cada sinalização semaforica da interseção é responsável em executar uma instância diferente da aplicação. Dessa forma, a lista de identificadores de vias de cada sinalização semaforica poderá ter mais de duas entradas, sendo que uma delas está relacionada à via de entrada, onde a sinalização semaforica está instalada. As demais vias, nesse caso, estão relacionadas às vias de saída, de acordo com os movimentos permitidos na interseção a partir da via de entrada. Um último exemplo pode ser as aplicações instaladas nos veículos. Devido à mobilidade dos veículos, essas aplicações, constantemente, atualizam a lista de identificadores de vias, à medida que trafegam em diferentes vias ao longo de uma determinada rota.

Para o nó enviar uma mensagem, o protocolo de comunicação deve receber quatro itens, que são: prefixo de destino, interesse, direção, identificador de via. Em [39], eram levados em consideração somente os três itens. A inclusão de mais um item tem como objetivo tirar a responsabilidade da camada de rede, no que diz respeito à inclusão automática do identificador de via quando a mensagem é construída. Antes de enviar a mensagem para seus vizinhos, o nó constrói a mensagem da seguinte maneira: (I) Configura o campo versão com a versão atual do protocolo; (II) Configura

o campo limite de saltos com o valor zero, de modo que esse valor incremente, à medida que a mensagem for encaminhada por outros nós; (III) Configurar o campo tamanho do cabeçalho com o valor inteiro correspondente; (IV) Configurar o campo identificador da mensagem com o valor atual do contador de mensagens enviadas; (V) Configurar o campo prefixo de destino com o dado de entrada correspondente; (VI) Configurar o campo prefixo de origem com o prefixo do nó; (VII) Configurar o campo interesse com o dado de entrada correspondente; (viii) Configurar o campo posição com o dado obtido por meio do dispositivo GPS instalado no nó; (IX) Configurar o campo direção com o dado de entrada correspondente; (X) Configurar o campo identificador de via com o dado de entrada correspondente.

Ao receber uma mensagem (msg_j), o nó i executa o Algoritmo 1. O algoritmo primeiro checa se o identificador da mensagem recebida ($msg_j.id$) existe na tabela de prefixos de origens e identificadores de mensagens recebidas ($tabelaIds_i$). Se verdadeiro, o nó descarta msg_j . Se falso, o nó registra $msg_j.id$ em $tabelaIds_i$ e, em seguida, incrementa o valor do campo limite de saltos ($msg_j.limSaltos$). Se o valor do campo limite de saltos é igual a um, o algoritmo registra o prefixo e posição da origem da mensagem na tabela de posições relativas dos vizinhos ($tabelaPos_i$). Isso permite o nó atualizar as posições relativas dos vizinhos que estão a um salto de distância. Em seguida, o algoritmo checa se o valor do campo identificador de via ($msg_j.idVia$) existe na lista de identificadores de vias. Se não existir, o nó descarta msg_j . Caso contrário, o nó calcula o seu posicionamento em relação à origem da mensagem. O resultado desse cálculo deve ser -1 ou 1, tornando possível determinar se a fonte da mensagem está atrás ou à frente do nó. Baseado nas posições relativas em $tabelaPos_i$, o nó pode determinar se ele ou qualquer outro vizinho é o nó mais distante da origem da mensagem. O algoritmo extrai tal informação da $tabelaPos_i$ e a armazena em $encPrfx$. Nos dois próximos passos, o algoritmo realiza o processo de filtragem herdado do protocolo de comunicação da RAdNet. Primeiro, ele checa se a tabela de interesses do nó i ($tabelaInt_i$) tem uma entrada igual ao interesse contido na mensagem recebida ($msg_j.interesse$). Após isto, o algoritmo checa se o prefixo da origem da mensagem ($msg_j.prfxOrg$) tem um ou mais pares de campos com valores iguais. Se o resultado da checagem relacionada aos interesses for igual a verdadeiro, o algoritmo checa se o nó i é o destino de msg_j ou se o prefixo de destino é nulo. Se verdadeiro, o algoritmo cria uma cópia de msg_j e a encaminha para a aplicação subscritora do interesse contido na mensagem recebida.

Antes de encaminhar as mensagens, o algoritmo checa se o casamento de campos dos prefixos e interesses ocorreu. Se falso, ele descarta msg_j . Caso contrário, ele espera por um período de tempo antes de enviar msg_j para todos os seus vizinhos. No entanto, três condições devem ser satisfeitas, são elas: (I) O nó i não é o destino de msg_j ; (II) O nó i é o nó mais distante da origem da mensagem; (III) msg_j não

Algoritmo 1: Protocolo de comunicação da RADNet-VE.

```
Entrada:  $msg_j$ 
1 se  $msg_j.id \in tabelaIds_i[msg_j.pfxOrg]$  então
2   | Descartar  $msg_j$ ;
3 senão
4   | Inserir  $msg_j.id$  em  $tabelaIds_i[msg_j.pfxOrg]$ ;
5   |  $msg_j.limSaltos := msg_j.limSaltos + 1$ ;
6   | se  $msg_j.limSaltos = 1$  então
7     | Inserir  $msg_j.posicao$  em  $tabelaPos_i[msg_j.pfxOrg]$ ;
8     fim
9     se  $msg_j.idVia \in lstIdVias_i$  então
10      |  $pos_i := calcPos(posicao_i, msg_j.posicao, msg_j.idVia)$ ;
11      |  $prfxEnc := prfx_i$ ;
12      |  $dist := calcDist(posicao_i, msg_j.posicao, msg_j.idVia)$ ;
13      | para cada  $posicao \in tabelaPos_i$  faça
14        | se  $pos_i = msg_j.direcao$  então
15          |  $distViz := calcDist(position, msg_j.position, msg_j.roadId)$ ;
16          | se  $distViz > dist \wedge distViz \leq diametroRadio/2$  então
17            |  $encPrfx := prefixo\ do\ vizinho$ ;
18            |  $dist := distViz$ ;
19          fim
20        fim
21      fim
22      |  $casInt := msg_j.interesse \in tabelaInt_i$ ;
23      |  $casPrfx := |prefix_i \cap msg_j.pfxOrg| > 0$ ;
24      | se  $casInt = verdadeiro \wedge (pos = msg_j.direcao \vee msg_j.direcao = 0)$  então
25        | se  $msg_j.pfxDest = nulo \vee msg_j.pfxDest = prefix_i$  então
26          | Enviar uma cópia de  $msg_j$  para aplicação;
27        fim
28      fim
29      | se  $casPrfx = verdadeiro \vee casInt = verdadeiro$  então
30        |  $encMsg := msg_j.pfxDest = nulo \vee msg_j.pfxDest \neq prefix_i$ ;
31        |  $posNo := encPrfx = prefix_0_i \wedge (pos = msg_j.direcao \vee msg_j.direcao = 0)$ ;
32        |  $encSaltos := falso$ ;
33        | se  $casInt = verdadeiro$  então
34          |  $encSaltos := msg_j.limSaltos < tabelaInt_i[msg_j.interesse]$ ;
35        | senão
36          |  $encSaltos := msg_j.limSaltos < limSaltosPadrao$ ;
37        fim
38        | se  $(encMsg \wedge posNo \wedge encSaltos) = verdadeiro$  então
39          | Espere uniforme(0, 1)/dist;
40          | Enviar  $msg_j$  para todos vizinhos $_i$ ;
41        | senão
42          | Descartar  $msg_j$ ;
43        fim
44      | senão
45        | Descartar  $msg_j$ ;
46      fim
47    | senão
48      | Descartar  $msg_j$ ;
49    fim
50 fim
```

excedeu o número máximo de saltos.

Se essas condições não são satisfeitas, o nó descarta msg_j . Para a primeira condição, o algoritmo checa se o nó i é o destino de msg_j . Quando essa condição não é satisfeita, uma aplicação associada a $msg_j.interesse$ recebeu uma cópia da mensagem recebida. Por isto, a mensagem deve ser descartada, pois ela alcançou o seu destino. Para a segunda condição, o algoritmo checa se o nó i é o nó mais distante da origem da mensagem e se seu posicionamento em relação a essa o permite encaminhar a mensagem para seus vizinhos. Se essa condição não é satisfeita, é devido a existência de um nó mais distante da origem da mensagem. Para a terceira

condição, o algoritmo checa se a mensagem alcançou o número máximo de saltos. Quando o interesse contido na mensagem recebida existe na tabela de interesses, o algoritmo checa se o valor do limite de saltos ($msg_j.limSaltos$) é menor que o número máximo de saltos registrado com o interesse. Caso contrário, o algoritmo checa se o valor do campo limite de saltos é menor que o número máximo de saltos padrão. Se uma dessas condições é falsa, msg_j é descartada.

Finalmente, o algoritmo determina o tempo de espera por meio do resultado da função de número aleatório da distribuição uniforme entre 0 e 1 dividido pela distância entre nó i e a origem da mensagem. O tempo de espera é necessário, pois ele evita que muitos nós encaminhem mensagens em instantes muito próximos. À medida que a mensagem é encaminhada para longe de sua origem, o tempo de espera diminui.

3.2 Rede *Ad Hoc* Veicular Heterogênea Centrada em Interesses

Devido à alta mobilidade dos veículos e à topologia dinâmica das redes *ad hoc* veiculares, é difícil fornecer serviços de sistemas inteligentes de transporte somente por meio de uma rede, que tem como base uma única tecnologia de acesso à comunicação sem fio, especificamente rádios de comunicação dedicada de curto alcance ou *Dedicated Short Range Communication* (DSRC). Atualmente, as tecnologias disponíveis de acesso à comunicação sem fio para ambientes veiculares são as que se baseiam em rádios de comunicação dedicada de curto alcance (IEEE 802.11 e IEEE 802.11p) e as que se baseiam em redes celulares (GSM, UMTS e LTE). No entanto, essas tecnologias têm suas próprias limitações quando usadas em ambientes veiculares. Em particular, tecnologias de acesso à comunicação sem fio, baseadas em rádios de comunicação de curto alcance, foram inicialmente projetadas para fornecer comunicações sem fio, sem a necessidade de uma infraestrutura pervasiva em ambientes como os de rodovias, estradas e ruas. Por outro lado, embora redes celulares possam fornecer uma ampla cobertura geográfica, elas não podem fornecer de maneira eficiente trocas de informações de tempo real em áreas locais. Conseqüentemente, integrar redes baseadas em tecnologias de acesso à comunicação sem fio, tais como IEEE 802.11, IEEE 802.11p, GSM, UMTS e LTE, é de grande relevância para o desenvolvimento de aplicações para sistemas inteligentes de transporte. Por isto, ZHENG *et al.* [24] argumenta que uma rede veicular heterogênea pode ser uma boa plataforma para atender os vários requisitos de comunicação dos serviços de sistemas inteligentes de transporte [55].

Com base nessa demanda, resolveu-se estender o projeto da RAdNet-VE [39],

a fim de criar uma rede *ad hoc* veicular heterogênea centrada em interesses, pois o protocolo de comunicação da RAdNet-VE é capaz de satisfazer os requisitos de comunicação das categorias de aplicações para redes *ad hoc* veiculares. Com isto, ao analisar o trabalho de [24], percebeu-se que o protocolo de comunicação da RAdNet-VE é capaz de satisfazer os requisitos de comunicação de parte dos serviços de sistemas inteligentes, devido aos bons resultados apresentados em [39]. Tais resultados serão apresentados nesta tese no capítulo apropriado. Com base nestes resultados e nos requisitos de comunicação de aplicações de serviços de sistemas inteligentes, decidiu-se incluir a capacidade de os nós RAdNet-VE poderem se comunicar por meio de redes celulares, mais especificamente LTE, por se tratar de um padrão mais recente desse tipo de tecnologia de acesso à comunicação sem fio. Portanto, criou-se a ***Heterogeneous InteRest-Centric Mobile Ad Hoc Network for Vehicular Enviornments*** (HRAdNet-VE).

Antes de apresentar como se deu a criação da HRadNet-VE, é necessário apresentar, ainda que brevemente, os requisitos de comunicação de aplicações de serviços de sistemas inteligentes de transporte. Portanto, tal tarefa cabe à seção seguinte.

3.2.1 Requisitos de Serviços de Sistemas Inteligentes de Transporte

O principal objetivo dessa seção é resumir os requisitos dos serviços de sistemas inteligentes de transporte. Tal levantamento de requisitos é fruto da bibliografia apresentada por ZHENG *et al.* [24]. Os serviços de sistemas inteligentes de transporte podem ser categorizados em serviços relacionados à segurança e serviços não relacionados à segurança [24].

Os serviços relacionados à segurança visam à redução do risco de acidentes envolvendo veículos e a diminuição da perda vidas humanas. Nesses serviços, a oportunidade e a confiabilidade são considerados requisitos altamente exigentes. A frequência mínima de mensagens periódicas dos serviços de segurança varia de 1 Hz (uma mensagem por segundo) a 10 Hz (dez mensagens por segundo). Deve-se, também, ser levado em consideração o tempo de reação da maioria dos motoristas, que pode variar de 0.6 s a 1.4 s. Por isso, é razoável restringir a latência máxima em não mais que 100 ms. Por exemplo, a latência máxima do aviso de detecção pré-colisão é de 50 ms. Maiores detalhes acerca dos requisitos de comunicação de serviços de sistemas inteligentes de transporte não relacionados à segurança podem ser vistos em [24]. Os requisitos de segurança e confiabilidade são muito rigorosos, devido às características dos serviços de segurança. Em serviços de segurança para sistemas inteligentes de transporte, são considerados dois tipos de mensagens:

- **Mensagens de ciência cooperativa:** são transmitidas periodicamente em

uma área de interesse, principalmente para propósitos de avisos em estradas ou rodovias. Frequentemente, a troca de mensagens envolve dados como estado do veículo, posição, velocidade, entre outros;

- **Notificação ambiental descentralizada:** essas mensagens são frequentemente disparadas por eventos especiais. As mensagens desse tipo têm como objetivo notificar em uma área potencialmente perigosa.

Os serviços não relacionados à segurança são usados principalmente para gerenciamento de tráfego, controle de congestionamento, melhoria da fluidez do tráfego, entretenimento, entre outros. O principal objetivo dos serviços não relacionados à segurança é tornar possível uma experiência de direção mais eficiente e confortável. Esses serviços não têm requisitos rigorosos acerca da latência e confiabilidade. Comparados aos serviços relacionados à segurança, serviços não relacionados à segurança têm diferentes requisitos de qualidade de serviço. Para a maioria dos serviços não relacionados à segurança, a frequência máxima de mensagens periódicas é de 1 Hz (uma mensagem por segundo), enquanto a latência máxima é 500ms. Maiores detalhes acerca dos requisitos de comunicação de serviços de sistemas inteligentes de transporte não relacionados à segurança podem ser vistos em [24].

No que diz respeito ao tratamento dos requisitos de comunicação das aplicações dos serviços de sistemas inteligentes de transporte, esses são tratados no projeto da RAdNet-VE, baseando-se nos requisitos de duas categorias de aplicações para redes *ad hoc* veiculares, que são: serviços de informações gerais e serviços de informações de segurança. No entanto, esses requisitos foram definidos a partir de comunicações, utilizando dispositivos de comunicação dedicada de curto alcance, como IEEE 802.11 e IEEE 802.11p. No trabalho de [38], os autores não detalham as aplicações das duas categorias citadas acima. Portanto, o trabalho de [24] fornece detalhes acerca dos requisitos de aplicações de serviços de sistemas inteligentes de transporte.

Com base nesses requisitos, foi possível, então, estender o projeto da RAdNet-VE e criar um porte da RAdNet-VE para redes *ad hoc* veiculares heterogêneas. Portanto, a próxima seção detalhará como tal processo se deu.

3.2.2 Projeto da Rede Veicular Heterogênea Centrada em Interesses e seu Protocolo de Comunicação

Em uma rede veicular heterogênea, um mesmo nó deve ser capaz de lidar com diferentes tecnologias de acesso à comunicação sem fio, sem a necessidade de um protocolo de comunicação específico para cada uma das interfaces de comunicação sem fio instaladas no nó. Neste sentido, para que o protocolo de comunicação da RAdNet-VE seja utilizado em uma rede *ad hoc* veicular heterogênea, é necessário,

inicialmente, identificar as tecnologias de acesso à comunicação sem fio, para que o protocolo de comunicação da RAdNet-VE tenha que lidar somente com mensagens de rede, sem conhecer qualquer detalhe tecnológico acerca do envio e recebimento de mensagens. Para tanto, o cabeçalho de mensagens da RAdNet-VE deve sofrer uma extensão, de modo que um cabeçalho de rede específico para a HRAdNet-VE seja criado. Portanto, essa extensão consiste na adição de um campo cujo nome é tecnologia de acesso à comunicação the (8 bits). Esse campo deve ser utilizado para identificar a tecnologia de acesso à comunicação sem fio de uma interface de comunicação.

Uma vez que as tecnologias de acesso à comunicação sem fio tenham sido identificadas, é possível isolar os detalhes de cada em componentes de software de responsabilidades bem definida. Tais responsabilidades estão relacionadas ao envio e recebimento de mensagens por meio das interfaces de acesso à comunicação sem fio instaladas nos nós. Para tanto, a camada de rede do nó deve ser capaz de instanciar tais componentes, conforme a disponibilidade das interfaces de acesso à comunicação sem fio. Tais componentes devem ser construídos a partir do uso de padrões de projeto de software tais como: *Abstract Factory* [56] e *Forwarder and Receiver* [54]. O *Abstract Factory* fornece uma interface para criação de famílias de objetos relacionados ou dependentes, sem especificar suas classes concretas [56]. O *Forwarder and Receiver* fornece uma interface transparente de comunicação inter-processo para sistemas de software com um modelo de interação *peer-to-peer*, introduzindo *forwarders* e *receivers* para desacoplar os *peers* de detalhes específicos da comunicação entre os nós de rede [54]. A fim de encapsular todos estes componentes sob uma única interface de acesso, o padrão de projeto *Wrapper Façade* deve ser utilizado, para de encapsular funções e dados de maneira mais concisa, robusta, portátil, manutenível e coesa [57].

Após o encapsulamento das interfaces de acesso à comunicação sem fio, foi necessário separar dados e estruturas de dados inerentes à operação do protocolo de comunicação. Neste sentido, para cada interface de acesso à comunicação sem fio devem existir as seguintes estruturas de dados: contador de mensagens enviadas, tabela de prefixos de origem e mensagens recebidas, tabela de interesses e números máximos de saltos, tabela de posições relativas de vizinhos dentro da área coberta pelo rádio de comunicação e lista de identificadores de vias. No que diz respeito ao prefixo do nó, esse não varia em função do número de interfaces de acesso à comunicação sem fio instaladas no nó. Em outras palavras, o prefixo do nó é o mesmo, independentemente do número de interfaces de acesso à comunicação sem fio instaladas no nó. Além disso, cada uma dessas estruturas de dados citadas acima é inicializada da mesma maneira como a RAdNet-VE as inicializa. No entanto, tal inicialização deve ser realizada para cada interface de acesso à comunicação sem fio

instalada no nó. Por fim, as aplicações que irão executar sobre uma rede *ad hoc* veicular heterogênea centrada em interesses devem registrar os interesses e seus respectivos números máximos de saltos na estrutura de dados correspondente à tecnologia de acesso à comunicação sem fio da interface que deverá receber as mensagens.

Para o nó enviar uma mensagem, o protocolo de comunicação deve receber cinco itens, que são: prefixo de destino, interesse, direção, identificador de via e tecnologia de acesso. A definição de qual interface de comunicação deve ser depender das operações das aplicações de serviços de sistemas inteligentes de transporte. Antes de enviar a mensagem para seus vizinhos, o nó constrói a mensagem conforme os passos descritos na Seção 3.1.3, além de configurar o campo tecnologia de acesso com o dado de entrada correspondente.

Por fim, ao receber uma mensagem por meio de uma das interfaces de acesso à comunicação sem fio, o nó executa o Algoritmo 1, mas utilizando as estruturas de dados correspondentes às tecnologias das interfaces de comunicação instaladas nos nós, como pode ser visto no Algoritmo 2. Dessa forma, o protocolo de comunicação da RAdNet-VE foi estendido completamente, tornando-se um protocolo de comunicação para uma rede veicular heterogênea, sendo i o nó que recebe uma mensagem de um nó j , que por sua vez pode ter enviado ou encaminhado a mensagem por meio de uma interface de uma tecnologia de acesso à comunicação sem fio, e tac é o identificador da tecnologia de acesso à comunicação sem fio utilizada tanto pelo nó j quanto pelo nó i .

Nessa seção, foram descritos os detalhes acerca do projeto da HRAdNet-VE e de seu protocolo de comunicação, aqui chamado de *HRAdNet-VE Protocol* (HRVEP).

3.3 Relação da RAdNet-VE e HRAdNet-VE com as Tecnologias de Acesso à Comunicação Sem Fio

Em [39, 52], o protocolo de comunicação da RAdNet-VE ou RVEP (*RAdNet-VE Protocol*) foi projetado para executar sobre nós com uma única interface de acesso à comunicação sem fio, sendo essa do tipo IEEE 802.11n ou IEEE 802.11p. Além disso, a proposta de GONÇALVES *et al.* [52] visou a atender os requisitos de comunicação das categorias de aplicações para redes *ad hoc* veiculares, criando o RVEP, de modo que esse fosse um protocolo de comunicação mais genérico possível. Portanto, a relação do RVEP com as tecnologias de acesso à comunicação sem fio baseadas em comunicação dedicada de curto alcance é exibida na Figura 3.1.

Algoritmo 2: Protocolo de comunicação da HRAdNet-VE.

```
Entrada:  $msg_{j,tac}$ 
1 se  $msg_{j,tac}.id \in tabelaIds_{i,tac}[msg_{j,tac}.prfxOrg]$  então
2   | Descartar  $msg_{j,tac}$ ;
3 senão
4   | Inserir  $msg_{j,tac}.id$  em  $tabelaIds_{i,tac}[msg_{j,tac}.prfxOrg]$ ;
5   |  $msg_{j,tac}.limSaltos := msg_{j,tac}.limSaltos + 1$ ;
6   | se  $msg_{j,tac}.limSaltos = 1$  então
7     | Inserir  $msg_{j,tac}.posicao$  em  $tabelaPos_{i,tac}[msg_{j,tac}.prfxOrg]$ ;
8   | fim
9   | se  $msg_{j,tac}.idVia \in lstIdVias_{i,tac} \vee msg_{j,tac}.idVia = \text{nulo}$  então
10    |  $pos_{i,tac} := calcPos(posicao_{i,tac}, msg_{j,tac}.posicao, msg_{j,tac}.idVia)$ ;
11    |  $prfxEnc := prfx_{i,tac}$ ;
12    |  $dist := calcDist(posicao_{i,tac}, msg_{j,tac}.posicao, msg_{j,tac}.idVia)$ ;
13    | para cada  $posicao \in tabelaPos_{i,tac}$  faça
14      | se  $pos_{i,tac} = msg_{j,tac}.direcao$  então
15        |  $distViz := calcDist(position, msg_{j,tac}.position, msg_{j,tac}.roadId)$ ;
16        | se  $distViz > dist \wedge distViz \leq diametroRadio_{tac}/2$  então
17          |  $encPrfx :=$  prefixo do vizinho;
18          |  $dist := distViz$ ;
19        | fim
20      | fim
21    | fim
22    |  $casInt := msg_{j,tac}.interesse \in tabelaInt_{i,tac}$ ;
23    |  $casPrfx := |prefix_{i,tac} \cap msg_{j,tac}.prfxOrg| > 0$ ;
24    | se  $casInt = verdadeiro \wedge (pos = msg_{j,tac}.direcao \vee msg_{j,tac}.direcao = 0)$  então
25      | se  $msg_{j,tac}.prfxDest = \text{nulo} \vee msg_{j,tac}.prfxDest = prefix_{i,tac}$  então
26        | Enviar uma cópia de  $msg_{j,tac}$  para aplicação;
27      | fim
28    | fim
29    | se  $casPrfx = verdadeiro \vee casInt = verdadeiro$  então
30      |  $encMsg := msg_{j,tac}.prfxDest = \text{nulo} \vee msg_{j,tac}.prfxDest \neq prefix_{i,tac}$ ;
31      |  $posNo := encPrfx = prefix_{i,tac} \wedge (pos = msg_{j,tac}.direcao \vee msg_{j,tac}.direcao = 0)$ ;
32      |  $encSaltos := falso$ ;
33      | se  $casInt = verdadeiro$  então
34        |  $encSaltos := msg_{j,tac}.limSaltos < tabelaInt_{i,tac}[msg_{j,tac}.interesse]$ ;
35      | senão
36        |  $encSaltos := msg_{j,tac}.limSaltos < limSaltosPadrao$ ;
37      | fim
38      | se  $(encMsg \wedge posNo \wedge encSaltos) = verdadeiro$  então
39        | Espere uniforme(0, 1)/dist;
40        | Enviar  $msg_{j,tac}$  para todos vizinhos $_{i,tac}$ ;
41      | senão
42        | Descartar  $msg_{j,tac}$ ;
43      | fim
44    | senão
45      | Descartar  $msg_{j,tac}$ ;
46    | fim
47  | senão
48    | Descartar  $msg_{j,tac}$ ;
49  | fim
50 fim
```

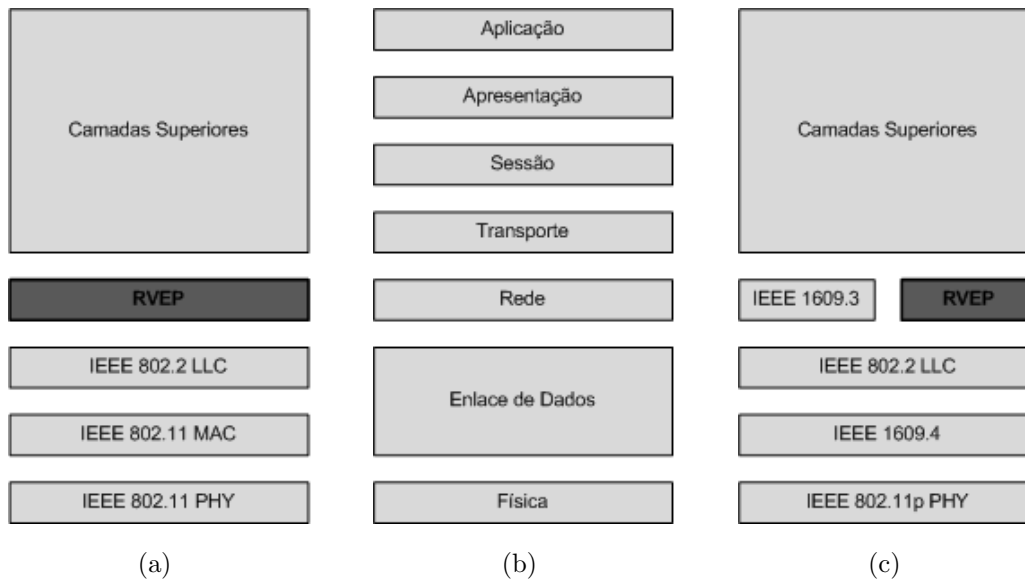


Figura 3.1: RVEP nas camadas de rede: (a) RVEP como um substituto do IP em nós equipados com rádios baseados no padrão IEEE 802.11; (b) modelo de referência OSI; (c) RVEP como um substituto do IP em nós equipados com rádios baseados no padrão IEEE 802.11p

Como pode ser visto, o RVEP foi projetado para ser um protocolo de camada de rede, a fim de substituir o IP ou compensar alguma deficiência deste. Neste sentido, o RVEP substitui o IP tanto na Figura 3.1(a) quanto na Figura 3.1(c). Como pode ser visto na Figura 3.1(c), o RVEP divide a camada de rede do nó com um componente definido pelo padrão IEEE 1609.3. Segundo [25], o padrão IEEE 1609.3 foi desenvolvido para dar suporte acerca do fornecimento e uso de serviços em múltiplos canais, além de ser parte do padrão IEEE 1609. O padrão IEEE 1609 é chamado de *Wireless Access Vehicular Environments (WAVE)*. Além disso, o padrão também define uma pilha completa de protocolos para sistemas inteligentes de transporte sobre o IEEE 802.11p. Apesar disso, esta tese não aborda assuntos relacionados à disseminação de *WAVE Service Advertisements (WSA)* e trocas de dados por meio de *WAVE Short Messages (WSMs)*, embora seja possível usar o RVEP como um único protocolo para a camada de rede sobre o IEEE 802.11p.

Com a criação da HRAdNet-VE e seu protocolo de comunicação, o HRVEP, esse não somente herda completamente as estruturas de dados e mecanismos do RVEP, mas também o estende, na direção de fazer com que a HRAdNet-VE seja uma proposta de uma rede veicular heterogênea centrada em interesses, tendo em vista que esse assunto ainda é pouco explorado na comunidade de redes veiculares [24]. Portanto, o HRVEP interage com as tecnologias de acesso à comunicação sem fio baseada em comunicação dedicada de curto alcance como o RVEP. No entanto, o nó não precisa possuir somente uma única interface de acesso à comunicação sem

fi, ele pode ser equipado com múltiplas interfaces. Além de redes formadas por dispositivos de comunicação dedicada de curto alcance, o HRVEP é capaz de lidar com redes celulares, conforme detalhado na seção anterior. Portanto, o HRVEP atua como um substituto do IP na camada de rede dos nós equipados simultaneamente com interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas nos padrões IEEE 802.11, IEEE 802.11p e LTE.

No que diz respeito às comunicações sem fio, usando interfaces de acesso baseadas no padrão LTE, a proposta do HRVEP não trata de comunicações veículo-a-veículo usando LTE *Device-to-Device* (D2D) [24]. Logo, os veículos não podem se comunicar diretamente uns com os outros por meio de redes celulares. Neste trabalho, os nós configurados como *User Equipments* (UEs) só podem se comunicar com nós configurados como *Evolved Node B* (eNodeB). Logo, os nós UE podem se movimentar e trocar dados com estações base, que são os nós eNodeB. No entanto, é possível que os nós UE se comuniquem uns com os outros de maneira indireta, desde que existam nós eNodeB, atuando como *relayers* na rede.

Capítulo 4

Definição dos Agentes dos Sistemas Multiagentes

Este capítulo tem como objetivo introduzir e descrever de forma alto nível os agentes utilizados tanto no sistema de controle de tráfego quanto no sistema de planejamento e orientação de rotas que são: Centro de Controle de Tráfego, Elemento Urbano, Veículo e Sinalização Semafórica. A descrições dos agentes busca tornar clara a participação no âmbito do sistema de controle de tráfego e do sistema de planejamento e orientação de rotas. Portanto, este capítulo é uma preparação para os detalhes acerca destes sistemas multiagentes, a partir dos dois capítulos subsequentes a este.

4.1 Agente Centro de Controle de Tráfego

Nesta tese, o agente Centro de Controle de Tráfego foi projetado para monitorar o estado de controle das interseções isoladas e interseções que participam de sistemas coordenados de sinalizações semafóricas, conforme definido na *National ITS Architecture 7.1* [55]. Para tanto, o agente Centro de Controle de Tráfego monitora as interações entre agentes Sinalização Semafórica, à medida que estes notificam uns aos outros sobre as mudanças de estado de seus mecanismos de controle de interseções e dos mecanismos de alocação de espaços nas vias de entrada das interseções, onde as sinalizações semafóricas que os embarcam atuam. A partir desse monitoramento de interações, o agente Centro de Controle de Tráfego atualiza um sistema supervisorio, que é responsável em monitorar o funcionamento do sistema de controle de tráfego. Para tanto, o agente Centro de Controle de Tráfego deve ser embarcado em um nó de rede cuja função é atuar como um *relay* de mensagens enviadas por meio de interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão LTE [24]. Nesta tese, considera-se que o sistema supervisorio usa os dados obtidos pelo agente Centro de

Controle de Tráfego para manter uma simulação do funcionamento do sistema real de controle de tráfego.

O estado da simulação mantida pelo sistema supervisorio é fundamental para a recuperação tanto dos controles de interseções isoladas quanto dos controles de sistemas coordenados de sinalizações semaforicas. Neste caso, os estados, relativos ao controle de interseções isoladas ou de sistemas coordenados de sinalizações semaforicas, podem ser recuperados por meio de uma interação entre um agente Veículo, responsável pelo controle de uma interseção, e o agente Centro de Controle de Tráfego. Tal estado de controle consiste em parâmetros de configuração das sinalizações semaforicas, assim como estruturas de dados de controle, além das leituras referentes aos fluxos de tráfego das vias de entrada das interseções. Após a recuperação desse estado, os veículos podem ser utilizados para controlar autonomamente interseções isoladas ou aquelas que integram os sistemas coordenados de sinalizações semaforicas, criando sinalizações semaforicas virtuais [58]. A condição para que isso aconteça é a detecção da ausência de funcionamento de sinalizações semaforicas. A ausência de funcionamento de sinalizações semaforicas pode ser causada por muitos fatores, dentre eles: falhas de equipamentos, falta de fornecimento de energia elétrica e acidentes.

Uma vez que uma sinalização semaforica para de funcionar, isso é rapidamente detectado pelo agente Centro de Controle de Tráfego, pois a interação entre os agentes Sinalização Semaforica e o agente Centro de Controle de Tráfego é interrompida. Se isso acontece em uma interseção, onde uma das sinalizações semaforicas embarca um agente Sinalização Semaforica responsável pelo controle de um sistema coordenado de sinalizações semaforicas, o controle não é afetado. Nesse caso, o controle de sistemas coordenados de sinalizações semaforicas é assumido pelo agente Centro de Controle de Tráfego. Portanto, esse agente se torna responsável por ativar e desativar sistemas coordenados de sinalizações semaforicas, bem como ajustar os tamanhos dos intervalos de indicações de luzes verdes, a fim de sincronizar os inícios de tais indicações. Aquelas interseções cujas sinalizações semaforicas não funcionam, em específico, as que são líderes de seus sistemas coordenados de sinalizações semaforicas, passam a ser controladas pelos veículos que se aproximam delas. Nesta tese, uma sinalização semaforica líder de um sistema coordenado de sinalizações semaforicas é sempre aquela que controla o primeiro seguimento de via do corredor, que é formado por uma rede de sinalizações semaforicas [1]. Sendo assim, o agente dessa sinalização semaforica é responsável pela ativação e desativação do sistema coordenado de sinalizações semaforicas.

Quando as sinalizações semaforicas voltam a funcionar, o agente Centro de Controle de Tráfego devolve o controle de sistemas coordenados de sinalizações semaforicas para os agentes Sinalização Semaforica responsáveis por tal tarefa. Além

dessa situação, relacionada aos sistemas coordenados de sinalizações semafóricas, existe outra, que se relaciona com a ausência de funcionamento de sinalizações semafóricas que integram esses sistemas. Uma vez detectada a ausência de funcionamento destas sinalizações semafóricas, os agentes Veículo podem recuperar os estados de controle das interseções, interagindo com o agente Centro de Controle de Tráfego, e, em seguida, controlar as interseções autonomamente. No que tange a ausência de funcionamento das sinalizações semafóricas instaladas em interseções isoladas, os agentes Veículo também podem recuperar os dados relativos ao controle delas e, após isso, controlar autonomamente o acesso a essas regiões da rede viária.

Além disso, outro ponto importante, no que tange a estratégia de manter uma simulação do sistema real de tráfego, é a manutenção das agendas de intervalos de indicações de luzes verdes cujas sinalizações semafóricas apresentam ausência de funcionamento. Uma vez que as sinalizações semafóricas apresentam ausência de funcionamento, seus agentes não podem gerar agendas de tempos com base nas configurações de controle vigentes, assim como, não podem compartilhar tais configurações com os demais agentes Sinalização Semafórica do sistema de controle de tráfego, de modo que estes últimos possam também gerar e manter as cópias dessas agendas.

Uma vez que os agentes Veículo tomam o controle das interseções, criando sinalizações semafóricas virtuais, eles interagem com o agente Centro de Controle de Tráfego e os agentes Sinalização Semafórica. Com base nisso, o agente Centro de Controle de Tráfego volta a monitorar o estado de controle das interseções isoladas e ou interseções participantes de sistemas coordenados de sinalizações semafóricas. Uma vez que as sinalizações semafóricas virtuais são criadas por meio da cooperação entre agentes Veículo, objetivando o controle de uma interseção, um agente Veículo se torna responsável pelo controle da interseção. Assim, esse interage com o agente Centro de Controle de Tráfego, como se fosse um agente Sinalização Semafórica, e com os vários agentes Sinalização Semafórica do sistema de controle de tráfego. Por meio da interação entre o agente Veículo, responsável pelo controle de uma interseção, com os demais agentes Sinalização Semafórica, o agente Centro de Controle de Tráfego monitora tais interações, e, com base nisso, atualiza o sistema supervisorio, de modo que esse mude o estado da simulação. Essas interações possibilitam que os agentes Sinalização Semafórica possam manter agendas de tempos relativas às sinalizações semafóricas virtuais. Os agentes Sinalização Semafórica também interagem com os agentes Veículo responsáveis pelas sinalizações semafóricas virtuais. Com isso, além de gerarem e manterem as agendas de intervalos de indicações de luzes verdes relativas ao controle das interseções por meio de sinalizações semafóricas virtuais, os agentes Veículo também recebem configurações de controle de outras interseções, enviadas pelos agentes Sinalização Semafórica presentes nestas, e, com

isso, gera e mantém cópias de agendas de tempos, enquanto são responsáveis pelo controle das interseções. Com isso, esses agentes Veículo podem também calcular rotas ótimas, alocar espaços de uso das vias de entradas das interseções e fornecer dados relativos às ondas verdes para os veículos que se aproximam das interseções por meio de suas vias de entrada.

Com a ausência de veículos se aproximando de interseções, onde as sinalizações semafóricas apresentam ausência de funcionamento, o agente Centro de Controle de Tráfego para de monitorar os estados de controle relativos a essas interseções, pois não existem sinalizações semafóricas virtuais. Por isso, o agente Centro de Controle de Tráfego altera os estados de controle das interseções na simulação mantida pelo sistema supervisorio, ajustando as representações dos mecanismos de controle dessas interseções, de modo que as representações das sinalizações semafóricas simulem o funcionamento destas, quando não existem fluxos de veículos nas vias de entrada se aproximando das interseções. Após isso, o agente Centro de Controle de Tráfego interage com os agentes Sinalização Semafórica, compartilhando as novas configurações de controle das interseções cujas sinalizações semafóricas apresentam ausência de funcionamento. Os agentes Sinalização Semafórica, então, geram novas agendas de tempos a partir das novas configurações de controle de interseções recebidas por eles. Esse processo é válido somente para interseções isoladas e aquelas que participam de somente um sistema coordenado de sinalizações semafóricas, pois estas últimas só participam da coordenação de sinalizações semafóricas, quando o sistema coordenado em que elas estão inseridas está ativo. Caso contrário, a interseção é vista como isolada e, por isso, é tratada como tal.

4.2 Agente Elemento Urbano

Nesta tese, o agente Elemento Urbano foi primeiramente projetado para representar entidades de mundo real, que estão presentes no ambiente urbano, tais como: instituições sociais e políticas; instalações educacionais e culturais; instalações comerciais e ou de serviços; instalações relativas ao estacionamento de veículos particulares; instalações de veículos comerciais; entre outros. Para tanto, esse agente deve ser embarcado em dispositivos capazes de se comunicar por meio de interfaces de acesso à comunicação sem fio, que permitam a comunicação indireta com sinalizações semafóricas e veículos. Logo, tal interface deve ser baseada no padrão LTE [24].

Uma vez que os agentes Elemento Urbano podem representar entidades de mundo real, eles podem interagir periodicamente tanto com agentes Sinalização Semafórica quanto com agentes Veículo, desde que esse último esteja controlando uma interseção, compartilhando dados que os associam a interesses. Com esses dados,

os agentes Sinalização Semafórica e Veículo, esse último, de acordo com a condição descrita anteriormente, registram os interesses na camada de rede de seus ambientes e os associam às ações executadas por estes agentes. Desta forma, os ambientes (sinalizações semafóricas e veículos conectados) são configurados com os interesses relacionados aos agentes Elemento Urbano, que estão operando dentro de uma região, onde os sistemas de controle de tráfego e planejamento e orientação de rotas atuam. Para tanto, o agente Elemento Urbano deve conter os seguintes parâmetros de configuração de performance: periodicidade de envio de mensagens interação e identificador da via onde se encontra.

Diferente dos ambientes relacionados aos agentes Sinalização Semafórica, os ambientes relativos aos agentes Veículo não mantêm, por muito tempo, os interesses registrados em suas camadas de rede, pois eles, à medida que seus agentes deixam de controlar interseções isoladas e cooperar com sistemas coordenados redes de sinalizações semafóricas, têm tais interesses removidos de suas camadas de redes. Outra finalidade relativa aos dados compartilhados pelos agentes Elemento Urbano é o uso destes para fins de atualização dos bancos de dados de mapas instalados nos dispositivos que embarcam os agentes Veículo. Assim, nesta tese, parte-se do princípio que os motoristas solicitam rotas ótimas até os elementos urbanos, utilizando os interesses contidos nos dados compartilhados por seus agentes Elemento Urbano. Por uma questão de simplificação, nesta tese, os agentes Veículo utilizam como interesse o nome da via onde o elemento urbano se encontra, para encontrar rotas ótimas. Logo, esta tese parte do princípio que os dispositivos que embarcam os agentes Veículo possuem uma interface, em que os motoristas buscam os elementos urbanos e, em seguida, os selecionam, fazendo com que os agentes Veículos obtenham rotas ótimas a partir das interações com agentes Sinalização Semafórica, tendo como base disso a comunicação centrada em interesses provida por uma rede *ad hoc* veicular heterogênea centrada em interesses.

Embora esta tese não aborde questões relativas à segurança de redes veiculares centradas em interesses, é necessário ressaltar que os interesses relativos aos agentes Elemento Urbano devem ser validados, a fim de evitar inconsistências nas associações entre os interesses e as ações executadas pelos agentes. No entanto, é importante indicar um possível caminho para tratar esse problema. Nesse sentido, esta tese aponta para a investigação do uso de técnicas baseadas em nomes auto-certificáveis [59], no que tange à validação de interesses. Nomes auto-certificáveis são nomes que permitem a verificação direta entre o nome e o objeto associado [59]. Nesse caso, o objeto associado pode ser o nome da ação a ser executada pelos agentes Veículo e Sinalização Semafórica.

4.3 Agente Veículo

Nesta tese, o agente Veículo foi projetado para interagir tanto com agentes Sinalização Semafórica quanto com outros agentes Veículo. Para tanto, tal agente precisa ser embarcado em um veículo conectado. Um veículo conectado é aquele capaz de se comunicar tanto com outros veículos quanto com elementos relativos a infraestrutura viária, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas em padrões tecnológicos, como IEEE 802.11 [22], IEEE 802.11p [23] e LTE [24]. Além disso, tal tipo de veículo também oferece capacidade de realizar computações, permitindo que os mesmos sejam utilizados em aplicações de software para área de sistemas inteligentes de transporte.

No que diz respeito à interação com agentes Sinalização Semafórica, no âmbito do sistema de controle de tráfego, os agentes Veículo interagem com estes agentes, a fim de informar a presença dos veículos nas vias de entrada de interseções controladas por sinalizações semafóricas. A interação em questão se dá sempre no escopo da via onde os veículos estejam trafegando e as sinalizações semafóricas estão instaladas. Portanto, tanto os agentes Veículo quanto os agentes Sinalização Semafórica têm ciência da via em que estão operando e, conseqüentemente, registram tal dado na camada de rede de seus ambientes. Por fim, os agentes Sinalização Semafórica precisam das interações com os agentes Veículos, para acumular conhecimento acerca das flutuações do fluxo de tráfego nas vias de entrada das interseções, onde suas sinalizações semafóricas estão instaladas. Os agentes Sinalização Semafórica utilizam esse conhecimento para ajustar o tamanho dos intervalos de indicações das sinalizações semafóricas em que estão embarcados.

No que diz respeito à interação entre agentes Veículo e agentes Sinalização Semafórica, no âmbito do sistema de planejamento e orientação de rotas, os agentes Veículo interagem com os agentes Sinalização Semafórica, requisitando rotas ótimas, de acordo com os destinos informados pelos motoristas dos veículos conectados em que os agentes estão embarcados. Como os agentes Sinalização Semafórica têm a base de conhecimento necessária para compartilhar o conhecimento de rotas ótimas com os agentes Veículo, eles compartilham estas rotas com os agentes Veículo. No instante em que os agentes Sinalização Semafórica interagem com os agentes Veículo, em resposta à interação anterior, estes últimos passam a ter conhecimento de rotas ao longo de uma rede viária, que podem auxiliar o motorista, enquanto esse dirige seu veículo conectado, objetivando uma viagem com o menor tempo possível.

Ainda no âmbito do sistema de planejamento e orientação de rotas, à medida que os agentes Veículo orientam os motoristas dos veículos, estes precisam interagir com os agentes Sinalização Semafórica novamente. Desta vez, os agentes Veículo precisam ter ciência acerca do posicionamento, comprimento e velocidade dos seguimentos

de ondas verdes nas vias em que as sinalizações semaforicas, contendo o tipo de agente correspondente às mesmas, estejam instaladas. Além disso, os agentes Veículo também precisam conhecer a duração do intervalo de verde disponibilizado pelo agente Sinalização Semaforica da via. O mecanismo das ondas verdes permite que os agentes Veículo orientem os motoristas dos veículos conectados, no que diz respeito ao controle de velocidade destes. Portanto, eles apenas orientam os motoristas dos veículos a tomarem as seguintes decisões: (I) acelerar o veículo conectado, caso esteja posicionado atrás do ponto de término do seguimento de onda verde, a fim de alcançá-lo; (II) manter a velocidade permitida da via, caso o veículo conectado esteja posicionado entre os pontos de início e fim do seguimento de onda verde; (III) reduzir a velocidade do veículo conectado, caso esteja posicionado à frente do ponto de início do seguimento de onda verde, a fim de esperar esse último, até que ele alcance o veículo. Essa ação pode levar a retirada de veículos sobre o fim do seguimento de onda verde.

Embora os agentes Veículo possam orientar motoristas a seguirem as velocidades recomendadas por eles, os mesmos precisam ter conhecimento acerca de outros agentes Veículo, operando na mesma via em que trafegam. Esse conhecimento é fundamental nas ações de orientação de velocidades, pois os agentes Veículos precisam conhecer o estado relativo do veículo que está imediatamente à frente do veículo conectado em que eles estão embarcados. Tal conhecimento é utilizado para auxiliar no cálculo da velocidade que um veículo conectado deve assumir, de acordo com as possibilidades de os motoristas alcançarem os seguimentos de ondas verdes, assim como se manterem nestes ou esperá-los, até que os veículos conectados sejam alcançados pelos mesmos.

Os agentes Veículo podem assumir também a responsabilidade de controlar interseções, criando sinalizações semaforicas virtuais, quando eles detectam a ausência de um agente Sinalização Semaforica em uma das vias de entrada de uma interseção controlada por sinalizações semaforicas. Desde então, o agente Veículo interage com o agente Centro de Controle de Tráfego, a fim de obter estado de controle da interseção, tais como os descritos na Seção 4.4. Uma vez que estado de controle de uma interseção tenha sido obtido por um agente Veículo, ele sabe se ele ou outro agente Veículo em uma via conflitante será o responsável em manter uma sinalização semaforica virtual, pois ambos passam a simular o funcionamento das sinalizações semaforicas da interseção de onde eles se aproximam, utilizando as configurações de controle da interseção. Caso a interseção tenha uma sinalização semaforica cujo agente Sinalização Semaforica controlava um sistema coordenado de sinalizações semaforicas, o agente Veículo assume as configurações fornecidas pelo agente Centro de Controle de Tráfego, que, nesse momento, está assumindo o controle de sistemas coordenados de sinalizações semaforicas. Dessa forma, um agente Veículo se torna

responsável por uma interseção, quando a sinalização semafórica virtual está indicando luz vermelha e o seu veículo conectado é o mais próximo da faixa de retenção da via.

Logo, durante intervalo de indicação de luz vermelha da sinalização semafórica virtual de sua via, ele é capaz de realizar as seguintes tarefas, de acordo com as configurações de controle da interseção em questão: manter agendas de tempos geradas com base em configurações de controle de interseções enviadas por sinalizações semafóricas; calcular rotas ótimas, à medida que os agentes Veículo as solicitam; alocar espaços nas vias de entrada das interseções; manter e compartilhar dados acerca dos posicionamentos das ondas verdes das vias de entrada da interseção, onde ele é responsável; ajustar os intervalos de luzes verde, de acordo com o fluxo das vias de entrada; notificar os responsáveis por outras interseções, sejam estes agentes Sinalização Semafórica ou agentes Veículo, acerca das atualizações do estado de controle da interseção; notificar os agentes Veículo, que estão embarcados nos veículos conectados que trafegam nas vias de entrada da interseção, acerca das atualizações do estado de controle da interseção.

No que tange aos demais agentes Veículo cujos veículos conectados trafegam pelas vias entrada da interseção, estes também simulam o funcionamento das sinalizações semafóricas da interseção para onde estão se dirigindo, de modo que os motoristas desses veículos tenham ciência das indicações das sinalizações semafóricas virtuais das vias de onde eles estão conduzindo seus veículos.

Durante o intervalo de amarelo de uma via cuja sinalização semafórica virtual indicava luz verde, os agentes Veículos interagem entre si, a fim de elegerem um líder, que é aquele cujo veículo conectado mais próximo da faixa de retenção da via onde eles trafegam. Após o intervalo de amarelo, aquele agente cujo veículo é o mais próximo da faixa de retenção da via onde ele se encontra, passa a ser o novo responsável pelo controle da interseção. Vale ressaltar que tal controle varia de acordo com interseção.

4.4 Agente Sinalização Semafórica

Nesta tese, o agente Sinalização Semafórica foi projetado com intuito de interagir tanto com os agentes Veículo quanto com outros agentes Sinalização Semafórica. Para isso, o agente deve ser embarcado em um dispositivo que não somente permita controlar as indicações presentes nos grupos focais das sinalizações semafóricas, mas, também, de realizar computações e se comunicar tanto com veículos conectados quanto com outras sinalizações semafóricas, sendo estas participantes de uma mesma interseção ou não. Isso etorna as sinalizações semafóricas inteligentes. Devido a essa característica, estes dispositivos devem ser equipados com interfaces de acesso

à comunicação baseadas nos padrões IEEE 802.11 [22], IEEE 802.11p [23] e LTE [24].

No que diz respeito à interação dos agentes Sinalização Semafórica com os agentes Veículo, no âmbito do sistema de controle de tráfego, os agentes Sinalização Semafórica interagem com tais agentes, a fim de tornar mais precisa a medição do fluxo de tráfego das vias de entrada das interseções controladas por sinalizações semafóricas. Para tanto, os agentes Sinalização Semafórica reiniciam o processo de notificação de presença de veículos que se aproximam da interseção controlada por suas sinalizações semafóricas. Assim, os agentes Veículo dão início à interação descrita na seção anterior, sempre que recebem uma mensagem de interação dos agentes Sinalização Semafórica, para tal fim.

Ainda no âmbito do sistema de controle de tráfego, os agentes Sinalização Semafórica interagem uns com os outros para atingir três objetivos, que são: (I) controlar interseções isoladas, levando em consideração as flutuações dos fluxos de tráfego das vias de entrada destes locais; (II) controlar interseções compartilhadas entre sistemas coordenados de sinalizações semafóricas, levando em consideração as flutuações de tráfego das vias que compõem os mesmos; (III) coordenar as redes de sinalizações semafóricas instaladas nos corredores, de modo que as sinalizações semafóricas tenham seus intervalos de indicações de luzes verdes reprogramados, a fim de permitir que pelotões de veículos atravessem os corredores, sem haver interrupções desnecessárias da locomoção do mesmos.

No âmbito do sistema de planejamento e orientação de rotas, os agentes Sinalização Semafórica interagem uns com os outros para atingir os seguintes objetivos, são eles: (I) manter atualizadas as cópias de agendas de intervalos de indicações de luzes verdes geradas com base nos estados de controle enviados pelas sinalizações semafóricas instaladas em interseções isoladas; (II) manter atualizadas as cópias de agendas de intervalos de luzes verdes geradas com base nos estados de controle enviados pelas sinalizações semafóricas, que são instaladas em interseções participantes de sistemas coordenados de sinalizações semafóricas; (III) alocar e desalocar espaços de uso em vias de entradas de interseções controladas por sinalizações semafóricas.

Capítulo 5

Controle Inteligente de Tráfego Utilizando Sinalizações Semafóricas e Veículos Conectados

Este capítulo apresenta a terceira contribuição desta tese, que é um sistema multiagente de controle de tráfego. Com base nas interações entre agentes Centro de Controle de Tráfego, Veículo e Sinalização Semafórica, foi possível criar estratégias de controle de tráfego para interseções isoladas, sistemas coordenados de sinalizações semafóricas e interseções cujas sinalizações semafóricas apresentam ausência de funcionamento. Essas estratégias, por sua vez, tiram proveito das características da HRAdNet-VE. Por esse motivo, todos os agentes envolvidos na construção do sistema precisam registrar seus interesses nas camadas de redes dos ambientes que os embarcam. Embora, nesse capítulo não sejam apresentados os processos de inicialização de cada um dos agentes citados acima, os mesmos foram descritos no relatório técnico disponibilizado por GONÇALVES [42].

A seções seguintes descrevem as estratégias de controle de tráfego no nível de interações entre os agentes citados anteriormente, assim como as ações executadas por eles. Detalhes de menor nível de abstração podem ser encontrados no relatório técnico disponibilizado por GONÇALVES [42].

5.1 Controlando Tráfego em Interseções Isoladas

Essa seção tem como objetivo apresentar a abordagem para controle de tráfego em interseções isoladas. Essa abordagem tem como base a proposta de PAIVA [1], que utiliza um algoritmo de escalonamento distribuído para controlar o acesso à área de uma interseção entre vias de uma rede viária. Tal algoritmo é o *Scheduling by Multiple Edge Reversal* (SMER) [60]. Em GONÇALVES [42], é apresentada, de

maneira resumida, como o SMER foi utilizado em PAIVA [1].

5.1.1 Monitoramento de Mudanças de Faixas ou Vias

Após o início de sua operação, os agentes Veículo iniciam o monitoramento de faixas, tendo em vista que o agente deve ter ciência da via em que eles estão trafegando. Para tanto, eles executam periodicamente o procedimento a seguir, de modo que eles possam detectar qualquer mudança de faixa ou via.

O agente Veículo obtém o identificador da via onde o veículo conectado se encontra e, em seguida, verifica se houve uma mudança de faixa ou via. Se verdadeiro, o agente remove o interesse *vehicle_out_<id. da via>*, antes que aconteça a atualização da via atual e anterior. Após isso, ele envia uma mensagem contendo o interesse *vehicle_out_<id. da via>*, incrementa o número de tentativas de notificação de mudança de faixa ou via e, por fim, inicia a espera de uma confirmação por parte de um agente Sinalização Semafórica. Agui, o agente envia a mensagem para frente, a fim de notificar o agente Sinalização Semafórica da via anterior. Além disso, o algoritmo reconfigura a camada de rede do ambiente, removendo a faixa ou via anterior e adicionando a faixa ou via atual.

Embora o veículo possa ter mudado de faixa ou via, ele precisa continuar enviando mensagens de notificação acerca da mudança de faixa ou via, caso algum agente Sinalização Semafórica não tenha tomada ciência desta mudança. Enquanto o número de tentativas de notificação de mudança for menor que o número máximo de tentativas de notificação de mudança, o agente Veículo envia mensagens de notificação e, em seguida, incrementa o número de tentativas de notificação de mudança.

5.1.2 Notificação de Presença de Veículo na Via

À medida que um veículo conectado entra nos seguimentos de via de uma rede viária, o agente Veículo inicia uma tentativa de interação com algum agente Sinalização Semafórica, conforme o parâmetro relativo à periodicidade de notificação de um veículo em uma via.

O agente Veículo verifica se a via possui sinalização semafórica. Se verdadeiro, ele verifica se o seu veículo conectado está dentro da área de monitoramento de tráfego relacionada à sinalização semafórica da instalada na via. Se verdadeiro, o ele verifica se algum agente Sinalização Semafórica confirmou sua presença na via. Se falso, ele verifica se o número de tentativas de notificação é menor que o parâmetro de configuração de performance. Se falso, ele inicia o controle de interseção utilizando veículos conectados. Se verdadeiro, ele cria o interesse *vehicle_on_<id. da via>* e, em seguida, cria uma mensagem de interação com mesmo. Por fim, o agente envia a mensagem e, em seguida, incrementa o número de tentativas.

Ao receber a mensagem, o agente Sinalização Semafórica verifica se a origem da mensagem está atrás da sinalização semafórica e se está dentro da área de monitoramento de tráfego da via. Se verdadeiro, ele verifica se o identificador da origem da mensagem não existe no conjunto de veículos da via. Se verdadeiro, ele registra o identificador da origem da mensagem no conjunto de veículos da via. Em seguida, ele cria uma mensagem contendo o interesse *roadway_presence_confirmation*. Essa mensagem deve ser enviada diretamente para a origem da mensagem recebida.

Ao receber uma mensagem de interação contendo o interesse *roadway_presence_confirmation*, o agente Veículo trata tal mensagem. O agente verifica se ele é o destino da mensagem. Se verdadeiro, ele verifica qual a interface de acesso à comunicação encaminhou a mensagem. Se for uma interface baseada no padrão IEEE 802.11, o algoritmo verifica se a mensagem possui um parâmetro *ctrlIntersecao*. Se verdadeiro, o veículo inicia o processo de controle de intersecao com veículos. Caso a mensagem de interação chegue por uma interface baseada no padrão LTE, o agente conclui que existe um responsável pelo controle da interseção. Por fim, ele interrompe as tentativas de identificar um agente responsável pelo controle da interseção.

Quando um agente Sinalização Semafórica recebe uma mensagem de interação contendo o interesse *vehicle_out_<id. da via>*, ele a trata, verificando se a origem da mensagem está atrás da sinalização semafórica e se está dentro da área de monitoramento de tráfego da via. Se verdadeiro, ele verifica se o identificador da origem da mensagem existe no conjunto de veículos da via. Se verdadeiro, ele remove o identificador da origem da mensagem no conjunto de veículos da via. Em seguida, ele cria uma mensagem contendo o interesse *roadway_left_confirmation*. Essa mensagem deve ser enviada diretamente para a origem da mensagem recebida.

Ao receber tal mensagem, um agente Veículo encerra a notificação de saída de uma faixa ou via.

5.1.3 Obtenção de Quantidade de Veículos em Vias

Para obter a quantidade de veículos de uma via, um agente Sinalização Semafórica precisa, periodicamente, acumular as quantidades de veículos que trafegaram na via durante intervalos de tempo para obtenção de tal dado. Após um determinado número de obtenções de quantidades de veículos, o agente precisa realizar uma agregação desses dados e, em seguida, compartilhar a sua demanda com outros agentes do sistema multiagente de controle de tráfego. Para tanto, de acordo com o valor do parâmetro de periodicidade de obtenção da quantidade de veículos de uma via, o agente escalona ações, que executam o Algoritmo 9, descrito em GONÇALVES [42]. Nesse algoritmo, o agente Sinalização Semafórica compartilha a média das quantidades de veículos com seus vizinhos de interseção e agente Centro de Controle

de Tráfego.

Além disso, o agente Sinalização Semafórica requisita, periodicamente, que os veículos dentro da área de monitoramento de tráfego reenviem suas notificações de presença. O agente envia para trás da sinalização semafórica uma mensagem com interesse *roadway_presence_request*.

Ao receber uma mensagem de interação, contendo o interesse *roadway_presence_request*, um agente Veículo trata esta mensagem, verificando se a via da origem da mensagem é igual à via onde o veículo está trafegando. Se verdadeiro, ele verifica qual a tecnologia de acesso à comunicação foi utilizada pela origem, quando esta enviou a mensagem. De acordo com a tecnologia de acesso à comunicação, o agente Veículo configura uma mensagem de resposta e, em seguida, a envia para a origem da mensagem recebida.

Ao receber a mensagem de interação, contendo o interesse *roadway_vehicle_amount*, um agente Sinalização Semafórica trata a mensagem, incrementando o número de médias de quantidades de veículos recebidas. Logo após, ele registra o valor do parâmetro *mediaQtdeVeiculos* com o identificador do agente origem da mensagem. Em seguida, ele verifica se o número de medias de quantidades de veículos recebidas é menor que o número de sinalizações semafóricas da interseção. Se verdadeiro, ele verifica se o agente recebeu as médias das quantidades de veículos de todos os seus vizinhos. Se verdadeiro, ele calcula a demanda de cada um dos agentes do multigrafo utilizado pelo algoritmo SMER para controle de interseções. Para tanto, ele utiliza o mesmo cálculo proposto por PAIVA [1]. Por fim, o algoritmo atribui zero ao número de médias de quantidades de veículos recebidas e calcula o mínimo múltiplo comum entre as demandas.

5.1.4 Controle e Ajuste de Intervalos de Indicações de Sinalização

À medida que o intervalo de indicação de luz verde termina, uma ação escalonada para indicação do intervalo de indicação de luz amarela entra em execução. O agente inicia verificando se ele está participando de um sistema coordenado de sinalizações semafóricas ativo. Caso não esteja, ele reverte as arestas do agente no multigrafo utilizado pelo algoritmo SMER de controle de interseções isoladas, utilizando seu identificador e a sua reversibilidade. Logo após, o agente verifica se a sinalização semafórica poderá trocar a indicação.

Para tanto, é verificado se o agente não possui quantidades de arestas orientadas para ele maiores ou iguais a reversibilidade do mesmo. Se verdadeiro, o algoritmo acende a luz amarela e, em seguida, escalona o acendimento da luz vermelha no mecanismo de planejamento do agente, utilizando o parâmetro de intervalo de indicação

de luz amarela. Caso contrário, o agente escalona novamente o acendimento da luz amarela no mecanismo de planejamento do agente, utilizando o intervalo mínimo de indicação de luz verde. Se isso acontece, ele envia uma mensagem de interação, contendo o interesse *edge_reversal*, para os demais agentes da interseção.

O escalonamento da ação relativa ao acendimento da luz vermelha tem como objetiva finalizar o processo de reversão de arestas durante a execução do algoritmo SMER para controle de interseções. O agente acende a luz vermelha da sinalização semafórica e, em seguida, ele finaliza, enviando uma mensagem de interação, contendo o interesse *edge_reversal* para os demais agentes da interseção.

Ao receber uma mensagem contendo o interesse *edge_reversal*, um agente Sinalização Semafórica verifica se a origem da mensagem é um vizinho de interseção. Se verdadeiro, ele reverte as arestas referentes à origem da mensagem no multigrafo, utilizando a reversibilidade da origem da mensagem. Em seguida, se o agente tiver quantidades de arestas revertidas para ele maiores ou iguais a sua reversibilidade, o agente escalona, para execução imediata, o acendimento da luz verde.

O agente acende a luz verde da sinalização semafórica. Em seguida, ele escalona a ação para acendimento da luz amarela no mecanismo de planejamento de ações do agente, utilizando o parâmetro de intervalo mínimo de indicação de luz verde. Após isso, o algoritmo verifica se o agente está participando de um sistema coordenado de sinalizações semafóricas. Se falso, o agente verifica se existe demanda calculada para a interseção. Se verdadeiro, ele calcula uma reversibilidade para o agente e, em seguida, compara a reversibilidade calculada com a mantida pelo agente. Se forem diferentes, o algoritmo ajusta o número de arestas em cada um dos arcos entre o agente e um vizinho. No próximo passo, o agente envia uma mensagem de interação, contendo o interesse *reversibility_change*, para os agentes da interseção. Por fim, o agente envia uma mensagem de interação para o agente Centro de Controle de Tráfego, contendo o mesmo interesse da mensagem anteriormente enviada. Nesse processo, o método para ajuste de reversibilidades proposto por SANTOS [61] é aplicado.

Ao receber uma mensagem contendo o interesse *reversibility_change*, a partir de um vizinho de interseção, um agente Sinalização Semafórica trata a mensagem, verificando se a origem da mensagem é vizinho na interseção. Se verdadeiro, o agente calcula a reversibilidade para a origem da mensagem e, em seguida, verifica se a reversibilidade calculada é diferente da conhecida pelo agente. Se verdadeiro, o agente atualiza a reversibilidade da origem da mensagem e, por fim, ajusta o número de arestas nos arcos entre a origem e seus vizinhos.

5.2 Controlando o Tráfego de Sistemas Coordenados de Sinalizações Semafóricas

Esta seção tem como objetivo apresentar a abordagem para controle de sistemas coordenados de sinalização semafórica. Essa abordagem tem como base a proposta de PAIVA [1], que utiliza SMER para controlar o acesso à área de uma interseção entre dois ou mais sistemas coordenados de sinalizações semafóricas.

5.2.1 Ativação de um Sistema Coordenado de Sinalizações Semafóricas

Ao iniciar sua operação, um agente Sinalização Semafórica líder de um sistema coordenado de sinalizações semafóricas deve verificar o estado inicial do multigrafo utilizado no controle de sistemas coordenados de sinalizações semafóricas. Essa verificação tem como objetivo saber se o agente poderá ativar o seu sistema coordenado de sinalizações semafóricas.

Se verdadeiro, o agente inicia a coordenação de sinalizações semafóricas, enviando uma mensagem de interação, contendo o interesse *participation_in_traffic_light_coordination*, a fim de fazer com que as sinalizações semafóricas de sua interseção participem da coordenação de sinalizações semafóricas. Após isso, ele inicializa o número de ciclos do sistema coordenado de sinalizações semafóricas. Em seguida, ele também inicializa as variáveis de controle referentes aos *offsets* do sistema coordenado de sinalizações semafóricas, instante do escalonamento para ação de participação da coordenação das sinalizações semafóricas e o tempo acumulado durante a ativação do sistema coordenado de sinalizações semafóricas.

Nos passos seguintes, o agente atualiza a reversibilidade do corredor, caso exista uma demanda calculada. Além disso, ele também ajusta a quantidade de arestas em cada arco entre o corredor e um vizinho. Para atualizar a reversibilidade em outros agentes líderes de sistemas coordenados de sinalizações semafóricas, ele envia uma mensagem de interação, contendo o interesse *corridor_reversibility_change*. Depois disso, ele simula a execução do algoritmo SMER para controle de tráfego.

Durante essa simulação, o agente reverte as arestas do líder do sistema coordenado de sinalizações semafóricas e, após isso, ele envia uma mensagem de interação, contendo o interesse *traffic_light_coordination*, para cada agente cuja sinalização semafórica é parte do sistema coordenado de sinalizações semafóricas. Para cada mensagem enviada, o agente calcula o *offset* de cada segmento de via do corredor, de modo que esse valor seja utilizado para dar precisão ao instante em que as sinalizações semafóricas iniciarão seus intervalos de indicação de luz verde, após a primeira onda verde ter sido gerada.

Ao receber uma mensagem de interação contendo o interesse *participation_in_traffic_light_coordination* um agente Sinalização Semafórica trata a mensagem, verificando se ele é vizinho da origem da mensagem. Se verdadeiro, o agente coopera com a coordenação de sinalizações semafóricas e, em seguida, reverte todas as arestas para o agente origem da mensagem. Após isso, a variável de controle de número de ciclos é inicializada. Por uma questão de segurança, o agente verifica qual a indicação atual da sinalização semafórica. Se a indicação da sinalização semafórica é verde, as seguintes ações são executadas: a luz amarela é acesa; ação de acendimento de luz amarela escalonada anteriormente é cancelada; e o acendimento da luz vermelha é escalonado, utilizando o parâmetro de intervalo de indicação de luz amarela. Se a indicação da sinalização semafórica é amarela, as seguintes ações são executadas: o acendimento da luz vermelha é cancelado; e um novo acendimento da luz vermelha é escalonado, utilizando o parâmetro de intervalo de indicação de luz amarela. Ao final, o agente envia uma mensagem de interação, contendo o interesse *confirmation_in_traffic_light_coordination*, para a origem da mensagem recebida.

Ao receber uma mensagem de interação contendo o interesse *confirmation_in_traffic_light_coordination* um agente Sinalização Semafórica trata a mensagem, verificando se a origem da mensagem é um vizinho de interseção. Se verdadeiro, ele incrementa o número de vizinhos participantes da interseção. Uma vez que o número de confirmações seja igual ao número de vizinhos participantes da interseção, ele cancela qualquer escalonamento de ação relativo ao acendimento de luzes da sinalização semafórica. Por fim, ele acende a luz verde da sinalização semafórica e, em seguida, escalona acendimento da luz amarela, tendo como base o parâmetro de intervalo de indicação de luz verde.

Ao receber uma mensagem de interação contendo o interesse *traffic_light_coordination* um agente Sinalização Semafórica trata a mensagem, verificando se o valor do parâmetro *corredor* pertence ao conjunto de identificadores de corredores e se o identificador da origem pertence ao conjunto de identificadores de controladores de sistemas coordenados de sinalizações semafóricas. Se verdadeiro, o algoritmo escalona uma ação no mecanismo de planejamento do agente, a fim de iniciar a participação da sinalização semafórica na coordenação de sinalizações semafóricas.

Uma vez que o tempo de escalonamento desta ação é atingido, o agente Sinalização Semafórica reverte todas as arestas para si. Por fim, uma mensagem de interação, contendo o interesse *participation_in_traffic_light_coordination*, é enviada para os agentes da interseção. Quando os agentes da interseção recebem a mensagem, eles passam a cooperar com o processo de coordenação de sinalizações semafóricas.

À medida que os agentes Sinalização Semafórica cooperam, enquanto um sistema coordenado de sinalizações semafóricas está ativo, eles trocam mensagens de interação, contendo o interesse *reversal_of_all_edges*, fazendo com que o algoritmo de

controle de interseções execute em modo SER.

5.2.2 Controle da Ativação de Sistemas Coordenados de Sinalizações Semafóricas

Um agente Sinalização Semafórica líder de um sistema coordenado de sinalização semafórica, ao executar a ação de acionamento da luz amarela, reverte as arestas direcionadas para ele no âmbito do controle de sistemas coordenados de sinalizações semafóricas, caso o número de ciclos seja zero. Para tanto, uma mensagem de interação, contendo o interesse *corridor_edge_reversal*, é enviada para todos os agentes controladores de sistemas coordenados de sinalizações semafóricas.

Ao receber uma mensagem de interação contendo o interesse *corridor_edge_reversal*, um agente Sinalização Semafórica líder de um sistema coordenado de sinalizações semafóricas trata a mesma, verificando se a mensagem de interação é proveniente de um corredor vizinho. Para isso, o algoritmo faz uso do parâmetro *corredor* contido na mensagem. Se verdadeiro, o algoritmo reverte as arestas do corredor cuja mensagem é proveniente. Em seguida, o algoritmo verifica se é possível escalonar o início de uma coordenação de sinalizações semafóricas. Para tanto, o agente líder de um sistema coordenado de sinalizações semafóricas precisa ter um número de arestas direcionadas nos arcos, que, por sua vez, seja maior ou igual a reversibilidade do corredor. Se verdadeiro, o algoritmo escalona para execução imediata o início da coordenação de sinalizações semafóricas. Isso faz com que um sistema coordenado de sinalizações semafóricas seja ativado.

5.2.3 Obtenção de Quantidades de Veículos em Corredores

Se um agente Sinalização Semafórica é participante de um ou mais sistemas coordenados de sinalizações semafóricas, mas o mesmo não é um líder, ele compartilha também a sua média de quantidades de veículos com o agente líder do sistema coordenado de sinalizações semafóricas em que ele faz parte. Para tanto, o agente interage com cada líder de sistema coordenado de sinalizações semafóricas em que o mesmo é participante, enviando uma mensagem de interação cujo interesse contido nela é *roadway_segment_vehicle_amount*.

Ao receber uma mensagem de interação contendo o interesse *roadway_segment_vehicle_amount*, um agente Sinalização Semafórica líder de um sistema coordenado de sinalizações semafóricas trata essa mensagem, registrando as médias das quantidades de veículos obtidas por cada participante de um sistema coordenado de sinalizações semafóricas. A partir dessas médias, o agente pode escolher a maior média entre elas e, em seguida, compartilhar com outros agentes controladores de sistemas coordenados de sinalizações semafóricas de um mesmo grupo.

Ao receber uma mensagem de interação contendo o interesse *group_member_vehicle_amount*, um agente Sinalização Semafórica líder de um sistema coordenado de sinalizações semafóricas trata essa mensagem, registrando as médias das quantidades de veículos obtidas em cada sistema coordenado de sinalizações semafóricas pertencente ao mesmo grupo. Com base nessas médias, um agente Sinalização Semafórica líder de um sistema coordenado de sinalizações semafóricas pode escolher a maior média entre elas e, em seguida, assumir esse valor como sua média de quantidade de veículos. Isso faz com que todos os agentes controladores dos sistemas coordenados de sinalizações semafóricas de um mesmo grupo assumam o mesmo valor de média de quantidades de veículos, conforme proposto por PAIVA [1]. Após isso, o algoritmo envia uma mensagem de interação, contendo o interesse *corridor_vehicle_amount*, a fim de compartilhar a média escolhida com os agentes líderes de sistemas coordenados de sinalizações semafóricas vizinhos.

Ao receber uma mensagem de interação contendo o interesse *corridor_vehicle_amount*, um agente Sinalização Semafórica líder de um sistema coordenado de sinalizações semafóricas trata a mesma, verificando se o valor do parâmetro *corredor* corresponde a um identificador de corredor vizinho. Se verdadeiro, o agente apenas associa o valor do parâmetro *mediaQtdeVeiculos* ao identificador do corredor cujo agente é a origem da mensagem recebida. Com as médias das quantidades de veículos de todos os corredores, cada agente Sinalização Semafórica líder de um sistema coordenado de sinalizações semafóricas pode atualizar o conhecimento das demandas dos corredores dos sistemas coordenados de sinalizações semafóricas.

5.2.4 Ajuste de Demandas dos Sistemas Coordenados de Sinalizações Semafóricas

O ajuste de demandas inicia verificando se o agente é um líder de sistema coordenado de sinalizações semafóricas. Se verdadeiro, ele calcula a soma de todas as médias de quantidades de veículos. Após isso, ele calcula a demanda de cada corredor do multigrafo utilizado pelo algoritmo SMER para controle de sistemas coordenados de sinalizações semafóricas. Em seguida, o mínimo múltiplo comum entre as demandas dos corredores é calculado. Todo esse procedimento foi proposto por SANTOS [61]. Com base nesse trabalho, o agente pode reajustar a reversibilidade do corredor e, conseqüentemente, o número de arestas dos arcos entre o corredor e os vizinhos desse. Se isso acontecer, uma mensagem de interação, contendo o interesse *corridor_reversibility_change*, é enviada.

Ao receber uma mensagem de interação contendo o interesse *corridor_reversibility_change*, um agente Sinalização Semafórica líder de um sistema coordenado de sinalizações semafóricas trata essa mensagem, inicializando a reversibilidade do cor-

redor com o valor um. Em seguida, ele verifica se a reversibilidade do corredor é igual a zero. Se verdadeiro, a reversibilidade do corredor recebe o valor do mínimo múltiplo comum calculado a partir das demandas dos corredores. Caso contrário, uma nova reversibilidade é calculada. No próximo passo, se a reversibilidade calculada for diferente da reversibilidade atual do corredor, a reversibilidade do corredor é atualizada e, em seguida, os números de arestas nos arcos entre o corredor e seus vizinhos são atualizados.

5.3 Notificando o Funcionamento das Sinalizações Semafóricas

Periodicamente, os agentes Sinalização Semafórica precisam enviar mensagens de interação, contendo o interesse *traffic_light*, para o agente Centro de Controle de Tráfego, a fim de que esse fique ciente do funcionamento das sinalizações semafóricas de uma interseção. À medida que o agente Centro de Controle de Tráfego recebe mensagens com esse interesse, ele atualiza o tempo de vida da sinalização semafórica. Caso um agente Sinalização Semafórica pare de enviar tais mensagens, o tempo de vida desse chegará a zero. Dessa forma, o agente Centro de Controle de Tráfego pode identificar a ausência de funcionamento das sinalizações semafóricas, em específico aquelas responsáveis pelo controle de um sistema coordenado de sinalizações semafóricas. Sempre que isso acontece, o agente Centro de Controle de Tráfego assume o controle dos sistemas coordenados de sinalizações semafóricas cujos agentes Sinalização Semafórica líder desse apresentam ausência de funcionamento. Quando um agente Sinalização Semafórica responsável pelo controle de um sistema coordenado de sinalizações semafóricas, volta a operar, o agente Centro de Controle de Tráfego devolve o controle para o agente os dados relacionados ao controle do sistema coordenado de sinalizações semafóricas.

5.4 Controlando Interseções com Veículos Conectados

Quando um agente Veículo detecta a ausência de funcionamento de uma sinalização semafórica na via onde ele trafega, ele inicia um controle de interseções utilizando veículos conectados. Para tanto, o agente Veículo precisa interagir com o agente Centro de Controle de Tráfego, a fim de obter os dados de controle das sinalizações semafóricas da interseção. Então, essa interação se dá quando o agente Veículo envia uma mensagem de interação com o interesse *intersection_control_data_request*. Tal mensagem contém um parâmetro *idIntersecao*.

Ao receber uma mensagem de interação, contendo o interesse *intersection_control_data_request*, o agente Centro de Controle de Tráfego trata a mesma, verificando a existência do identificador da interseção na base de dados de interseções. Se verdadeiro, o agente obtém os dados de controle da interseção. Esses dados contêm todos os parâmetros relativos às sinalizações semafóricas, o modo de controle da interseção, o estado atual das indicações das sinalizações semafóricas, que, por sua vez, é dado pelo estado do multigrafo utilizado pelo algoritmo SMER para controle de interseções isoladas. Vale ressaltar que o estado do controle da interseção é fornecido por uma simulação do sistema de controle de tráfego real, que é mantida por um sistema supervisor no centro de controle de tráfego. Após os dados de controle da interseção terem sido obtidos, esses são enviados para o agente Veículo que os requisitou. Para tanto, o agente Centro de Controle de Tráfego cria uma mensagem de interação com o interesse *intersection_control_data* e destino igual à origem da mensagem recebida. Por fim, a mensagem é enviada.

Ao receber uma mensagem de interação contendo o interesse *intersection_control_data*, um agente Veículo a trata, obtendo a identificação interseção por meio da identificação da via onde o veículo está trafegando. Em seguida, ele compara esta identificação com o valor do parâmetro, que é obtido a partir da mensagem recebida. Se os valores forem iguais, o algoritmo obtém os dados de controle de interseção e, com base neles, cria uma sinalização semafórica virtual, que, por sua vez, possui as estruturas de dados necessárias tanto para executar localmente os algoritmos de controle de interseção quanto aquelas necessárias para interação com outros agentes. Uma vez criada a sinalização semafórica virtual, esta entra em operação. Se a indicação da sinalização semafórica for diferente de verde para via atual do veículo, ele inicia a eleição de líder.

O processo de eleição de líder em uma via dura até a sinalização semafórica virtual indicar luz verde para via. Enquanto isso não acontece, um agente Veículo verifica, a cada segundo, se a indicação da sinalização semafórica virtual é diferente de verde. Se verdadeiro, uma mensagem de interação com o interesse *vehicle_position* é enviada para todas as direções da via.

Ao receber uma mensagem de interação contendo o interesse *vehicle_position*, o agente Veículo trata a mesma, verificando se a indicação da sinalização semafórica virtual é diferente de verde. Se verdadeiro, o agente prossegue, calculando a distância geométrica entre o seu veículo e a faixa de retenção da via. A partir disso, ele compara tal dado com as distâncias de todos os veículos conectados conhecidos. Se a distância de um veículo é menor, esse passa a ser o líder. Ao final, o agente compara se o identificador do líder é o mesmo identificador do agente Veículo. Se verdadeiro, o veículo conectado do agente é o líder e, por isso, precisa ser configurado como tal. Caso contrário, a configuração de líder é desfeita.

A configuração de um agente Veículo como um líder se dá por meio da associação de ações a interesses já registrados na camada de rede do ambiente, tais como *vehicle_on-<id da via>* e *vehicle_out-<id da via>*. Dessa forma, o líder pode registrar a presença de veículos conectados na via onde ele está trafegando. No entanto, ele precisa ter ciência da quantidade de veículos de outras vias de entrada da interseção. Para tanto, o agente também registra os interesses citados na interface de acesso à comunicação baseada no padrão LTE, adotando um número máximo de saltos igual a um. Ao fazer isso, o líder interage com o agente Centro de Controle de Tráfego, de modo que esse último torne o agente Veículo responsável pela interseção, registre os mesmos interesses e, finalmente, associe ações aos mesmos, a fim de que as mensagens de interação enviadas por agentes Veículo, em outras vias de entrada da interseção, possam ser direcionadas para o líder. Além disso, o agente Centro de Controle tira proveito desses dados para atualizar o estado do controle da interseção na simulação mantida pelo sistema supervisorio.

Quando o agente Veículo, que é líder em uma via, recebe uma mensagem de interação contendo o interesse *intersection_control_data_request*, isso significa que, as sinalizações semafóricas virtuais em uma via de movimento conflitante em relação à da via do líder estão indicando amarelo. Logo, um novo líder foi identificado. Por isso, o agente receptor desta mensagem deve repassar todos os dados de controle da interseção para o novo líder, enviando uma mensagem de interação com o interesse *intersection_control_data*. Durante a criação desta mensagem, o agente líder introduz dois parâmetros, que são: *dadosControleIntrsc* e *idAgenteLider*. Ao primeiro parâmetro, são atribuídos todos os dados relativos ao controle da interseção. O último parâmetro mantém o identificador do novo líder, que, por sua vez, é a origem da mensagem de interação recebida pelo agente.

Quando o agente Centro de Controle de Tráfego recebe a mensagem de interação, contendo o interesse *intersection_control_data*, ele atualiza os dados de controle da interseção e, em seguida, encaminha a mensagem para o novo líder da interseção. Este, então, realiza todo o processo descrito anteriormente.

Capítulo 6

Planejamento e Orientação Inteligentes de Rotas Baseado em Interesses de Motoristas

Este capítulo apresenta a quarta contribuição desta tese, que é um sistema multiagente de planejamento e orientação de rotas. Com base nas interações entre agentes Elemento Urbano, Centro de Controle de Tráfego, Veículo e Sinalização Semafórica, foi possível criar uma estratégia de planejamento e orientação de rotas. Tal como as estratégias de controle de tráfego, a estratégia de planejamento e orientação de rotas tira proveito das características da HRAdNet-VE. Por esse motivo, todos os agentes envolvidos na construção do sistema precisam registrar seus interesses nas camadas de redes dos ambientes que os embarcam. Embora, nesse capítulo não sejam apresentados os processos de inicialização de cada um dos agentes citados acima, os mesmos foram descritos no relatório técnico disponibilizado por GONÇALVES [42].

A seções seguintes descrevem a estratégia de planejamento e orientação de rotas no nível de interações entre os agentes citados anteriormente, assim como as ações executadas por eles. Detalhes de menor nível de abstração podem ser encontrados no relatório técnico disponibilizado por GONÇALVES [42].

6.1 Registrando Interesses Relacionados aos Elementos Urbanos

Após terem sido inicializados, os agentes Elemento Urbano interagem com os agentes Sinalização Semafórica, enviando, a cada minuto, mensagens de interação contendo o interesse *urban_element_data*. Assim, os agentes enviam uma lista de termos, aqui chamados de interesses de usuário, e o identificador da via onde o elemento urbano relacionado a tais termos se encontra.

Ao receber uma mensagem de interação contendo o interesse *urban_element_data*, o agente Centro de Controle de Tráfego registra um interesse, que é a concatenação da *string route_to* com o identificador da via contido no parâmetro *idVia* da mensagem recebida. O agente registra o interesse em uma interface de acesso à comunicação baseada no padrão LTE com um número máximo de saltos igual a um. Além disso, a ação associada ao interesse registrado permite que o agente Centro de Controle de Tráfego encaminhe mensagens de interação, contendo tal interesse, para os agentes responsáveis pelos controles das interseções, sejam esses agentes Sinalização Semafórica e Veículo.

Além do interesse citado acima, o agente Centro de Controle de Tráfego também registra o interesse *calculated_route_<id. da via>*, de modo que o agente possa encaminhar, se necessário, a mensagem para um agente Veículo requerente de um cálculo de rota ótima. O agente registra o interesse em uma interface de acesso à comunicação baseada no padrão LTE com um número máximo de saltos igual a um. Por fim, o agente Centro de Controle de Tráfego encaminha a mensagem recebida para cada agente responsável em controlar uma interseção.

Quando um agente Sinalização Semafórica recebe a mensagem encaminhada pelo agente Centro de Controle de Tráfego, ele extrai o valor do parâmetro *idVia* da mensagem de interação recebida e o concatena também com a *string route_to*. O agente registra esta concatenação como um interesse em mais de uma interface de acesso à comunicação. No que diz respeito a um agente Veículo responsável pelo controle de uma interseção, ele também realiza o mesmo procedimento, quando esse recebe a mensagem encaminhada pelo agente Centro de Controle de Tráfego. Após isso, ele associa as ações que permitem tratar mensagens contendo o interesse. Após os registros de interesses, tanto os agentes Sinalização Semafórica quanto os agentes Veículos encaminham a mensagem recebida por meio das interfaces de acesso à comunicação baseadas nos padrões IEEE 802.11 e IEEE 802.11p, de modo que a mensagem seja recebida pelos agentes Veículos que trafegam nas vias de entrada das interseções.

Quando os agentes Veículo recebem a mensagem de interação, eles extraem uma lista de interesses de usuários, utilizando parâmetro *listaInteressesUsuario* e, em seguida, atualizam os dados relativos ao elemento urbano no sistema de planejamento e orientação de rotas. Eles também registram o interesse, conforme descrito anteriormente.

Por fim, os agentes Veículo registram o interesse *calculated_route_to_<id. da via>*. Vale ressaltar que, quando um agente Veículo deixa de ser líder, ele desassocia a ação de cálculo de rotas ótimas dos interesses registrados e os reconfigura.

6.2 Gerando Agendas de Intervalos de Indicações de Luzes Verdes

A geração de uma agenda de intervalos de indicações de luzes verdes é de extrema importância para o sistema de planejamento e orientação de rotas, pois, por meio desta, é possível saber a disponibilidade das vias de entradas das interseções de uma rede viária, à medida que as sinalizações semafóricas que as controlam indicam luz verde durante intervalos de tempo determinados pela configuração do multigrafo, que é utilizado pelo algoritmo de controle de interseção.

Após a inicialização de variáveis de controle e estruturas de dados, o agente simula, até um determinado instante de tempo, o funcionamento do controle da interseção, até um determinado instante de tempo. Para tanto, ele verifica se o conjunto de vértices em operação está vazio. Se verdadeiro, para cada vértice existente no conjunto de vértices, é verificado se o vértice possui arestas revertidas para ele. Se verdadeiro, o vértice é incluído no conjunto de vértices em operação, um mapeamento entre o vértice e o tempo de início de um intervalo de indicação de luz verde é adicionado ao mapa de tempos iniciais e, por fim, uma entrada no mapa dos tamanhos de intervalos de indicações de luzes verdes relativos a cada vértice em operação é adicionada.

Após isso, para cada vértice em operação é verificado se a interseção participa de uma coordenação de sinalizações semafóricas. Se falso, o agente reverte as arestas do vértice. Caso contrário, o agente reverte todas as arestas do vértice. Em seguida, é verificado se o vértice ainda possui arestas revertidas para ele. Se falso, o agente realiza os seguintes passos: inclusão do vértice no conjunto de vértices bloqueados; inclusão de um início de intervalo de indicação de luz verde na lista de inícios de intervalos de indicações de luzes verdes; inclusão de um fim de intervalo de luz verde na lista de fins de intervalos de indicações de luzes verdes; inclusão de uma lista de mapas de alocações de espaços na via; inclusão de um mapa de alocações à lista de mapas de alocações de espaços de uma via; e atualização de uma entrada no mapa dos tamanhos de intervalos de indicações de luzes verdes relativos a cada vértice em operação.

Em seguida, para cada vértice existente no conjunto de vértices bloqueados, o agente remove o mesmo do conjunto de vértices em operação. Após isso, o agente verifica se o tamanho do conjunto de vértices em operação é igual a zero. Se verdadeiro, ele encontra o maior intervalo de indicação de luz verde de um vértice e o tempo de indicação de luz amarela do vértice. Em seguida, os seguintes passos são executados: atualização do tempo; atualização do tempo inicial; inserção do mapa de tamanhos de intervalos de indicações de luzes verdes relativos aos vértices na lista de tamanhos de intervalos de indicações de luzes verdes; incremento da fase

da interseção. Em seguida, o agente avança para um novo instante de tempo da simulação do funcionamento de controle da interseção.

Uma vez que o sistema de planejamento e orientação de rotas é projetado com base nos agentes utilizados no sistema de controle de tráfego, algumas modificações precisam ser feitas nesse último sistema, de modo que a funcionalidade de geração de agendas de intervalos de indicações de luzes verdes seja incorporada aos agentes responsáveis pelo controle de interseções. Nesse sentido, inicialmente, todas os agentes Sinalização Semafórica devem gerar agendas de intervalos de indicações de luzes verdes, quando os mesmos estiverem entrando em operação. Além disso, o mesmo procedimento deve ser executado quando um agente Sinalização Semafórica muda sua reversibilidade e os números de arestas nos arcos entre o agente e seus vizinhos. No caso dos agentes Sinalização Semafórica que iniciam a sua participação em uma coordenação de sinalizações semafóricas de um sistema coordenado de sinalizações semafóricas ativo, esses também devem gerar agendas de intervalos de indicações de luzes verdes, pois as agendas precisam refletir a execução do algoritmo SMER, como se esse fosse o algoritmo SER. No findar de tal participação, os agentes Sinalização Semafórica precisam gerar agendas de intervalos de indicações de luzes verdes, pois a interseção volta a operar com o algoritmo SMER para controle de interseções isoladas, se for o caso.

No caso daqueles agentes Veículos, que, por ausência do funcionamento das sinalizações semafóricas de uma interseção, assumem o controle desta, geram agendas de intervalos de indicações de luzes verdes, de acordo com os dados de controle de interseção obtidos do agente Centro de Controle de Tráfego. Com base nesses dados, esses agentes executam o mesmo procedimento descrito acima.

Por fim, sempre que a geração de agendas de intervalos de indicações de luzes verdes é realizada, é necessário que todos os agentes responsáveis pelo controle de uma interseção, incluindo agentes Veículos, tomem ciência dessas ações. Para que um agente Veículo responsável pelo controle de uma interseção possa tomar ciência das agendas de intervalos de indicações de luzes verdes de outras interseções, eles registram o interesse *new_traffic_light_schedule*.

6.3 Compartilhando as Agendas de Intervalos de Indicações de Luzes Verdes

À medida que agendas de intervalos de indicações de luzes verdes são geradas, os agentes responsáveis pelo controle de uma interseção precisam interagir com outros agentes de mesma responsabilidade, compartilhando os dados de controle de sua interseção. Quando os agentes recebem esses dados, eles realizam a geração de agendas

de intervalos de indicações de luzes verdes. Dessa forma, esses agentes passam a ter ciência dos intervalos de indicações de luzes verdes de todas as interseções de uma rede viária.

Ao receber uma mensagem de interação, contendo o interesse *new_traffic_light_schedule*, os agentes responsáveis pelo controle de uma interseção tratam esta mensagem, gerando agendas de intervalos de indicações de luzes verdes, com base em um parâmetro extraído da mensagem. Tal parâmetro contém os dados de controle de alguma interseção, em que uma ou mais sinalizações semaforicas sofreram algum tipo de ajuste em seus intervalos de indicações de luzes verdes. Uma vez que os intervalos de indicações de luzes verdes tenham sido gerados utilizando os dados de controle de outras interseções, os agentes responsáveis pelo controle de uma interseção podem utilizá-los no cálculo de rotas ótimas, levando em consideração os espaços, que são alocados nas vias em cada intervalo de indicação de luz verde.

Por fim, o agente envia uma mensagem de interação contendo o mesmo interesse da mensagem recebida, para os veículos conectados. Além disso, a mensagem deve ser propagada no sentido oposto da via, ou seja, para trás dos veículos conectados. Todo agente Veículo, ao receber tal mensagem, requisita um novo cálculo de rotas, devido às modificações nas agendas de intervalos de luzes verde das interseções controladas pelo sistema de controle de tráfego.

6.4 Calculando Rotas Ótimas

Uma vez que os agentes responsáveis pelo controle de interseções tenham conhecimento de todas as agendas de intervalos de indicações de luzes verdes das interseções de uma rede viária, eles podem receber mensagens de interação oriundas de veículos conectados, desde que estejam na mesma via. Aqui, o intuito dessas mensagens de interação é requisitar o cálculo de rota ótima para um determinado destino. Nesse momento, fica mais clara a utilidade das listas de interesses de usuários, que são publicadas pelos agentes Elemento Urbano.

Os termos contidos nessas listas auxiliam o motorista quando esse realiza a busca por um determinado local do mapa, que é a via onde se encontra o elemento urbano desejado. Essa busca pode ser motivada, por exemplo, pelo interesse do motorista em encontrar gasolina mais barata, promoções das mais diversas, eventos, entre outros. Uma vez que os destinos tenham sido escolhidos pelos motoristas, agentes Veículos iniciam o processo de cálculo de rotas ótimas, tentando interagir com os agentes responsáveis pelo controle das interseções. Para tanto, os esses agentes escalonam periodicamente ações, que resultam em requisições de cálculos de rotas ótimas.

Nessas ações, o agente verifica se o ele já possui uma rota calculada. Se falso, ele envia uma mensagem de interação na mesma via em que o veículo conectado se

encontra. Tal mensagem é enviada para frente, de modo que o agente responsável pelo controle da interseção possa ser alcançado. Após enviar a mensagem, o agente incrementa o número de tentativas de requisição de cálculo de rotas ótimas. Tudo isso é feito se o número de tentativas é menor que o valor do parâmetro de número máximo de tentativas de requisição de rotas ótimas. Por fim, se o agente possuir uma rota calculada, o algoritmo mantém o número de tentativas de requisições de cálculos de rotas ótimas com o valor zero.

Ao receber a mensagem de interação contendo o interesse *route_to-<id. da via>*, os agentes responsáveis pelo controle de uma interseção tratam esta, verificando se a mensagem de interação recebida possui o parâmetro *rota*. Se verdadeiro, o algoritmo verifica se os instantes de tempo relativos a cada componente da rota estão dentro de um limite de tempo tolerável, quando esses são comparados com os tempos das alocações de espaços na via. Se verdadeiro, o algoritmo devolve a rota para o agente Veículo requerente. Caso contrário, ele calcula uma nova rota ótima para o requerente. Caso a mensagem não contenha uma rota, o algoritmo calcula uma nova rota ótima para o agente, que é a origem da mensagem de interação recebida.

Para calcular uma rota ótima, o agente responsável pelo controle da interseção extrai os parâmetros *destino* e *posicaoGPS* da mensagem recebida. Em seguida, ele inicia uma lista cuja finalidade é armazenar os seguimentos de via componentes da rota ótima. Além desta estrutura de dados, também são inicializados um mapa para associar as vias e os instantes de tempo em que o veículo conectado atravessará as mesmas. Após isso, o agente calcula o custo inicial para o veículo conectado atravessar a via, onde ele e o agente Veículo requerente estão localizados. Nos próximos passos, o algoritmo obtém os identificadores das faixas da via e o conjunto de vias controladas por sinalizações semaforicas. Além disso, ele inicializa um acumulador de tempo de viagem.

Partindo desse pressuposto, o agente responsável pelo controle da interseção inicia o cálculo de rotas ótimas, tomando como início as faixas da via em que o veículo conectado requerente está trafegando. Dessa forma, para cada faixa da via, o algoritmo calcula uma rota ótima até o destino. Esse cálculo tem como base o algoritmo de caminho mais curto de Dijkstra, que é combinado com as premissas das heurísticas de despacho EDD (*Earliest Due Date*) e SPT (*Short Processing Time*). Essas heurísticas podem ser encontradas na literatura de escalonamento de sistemas flexíveis de manufatura do tipo *job-shop*. No que diz respeito à heurística EDD, esta é utilizada para selecionar a via com menor custo de tempo. Em seguida, aplica-se a heurística SPT cujo objetivo é identificar, dentre as vias com menor custo de tempo, aquela via que irá impor o menor atraso, quando um veículo conectado for trafegar por ela. Por fim, é verificado se existe espaço na via selecionado, a fim de que esse

possa ser utilizado no processo de alocação de espaços em vias. Se verdadeiro, a via passa a fazer parte da rota, que está sendo calculada para o requerente de um cálculo de rota ótima.

Para cada rota ótima calculada, o agente responsável pelo controle da interseção compara com outra rota anteriormente calculada pelo mesmo, caso esta última exista, a fim de encontrar a melhor rota ótima dentre as que foram calculadas. Com base na melhor rota ótima, o algoritmo aloca espaços nas vias nas agendas de intervalos de indicações de luzes verdes. Nesse processo de alocação, se existir uma rota anteriormente alocada, ela é removida e, em seguida, dá lugar à alocação de uma nova rota.

Por fim, os agentes Veículo requisitam novos cálculos de rotas ótimas, quando recebem mensagens de interação cujo interesse é *new_traffic_light_schedule*. Além disso, eles também requisitam novos cálculos de rotas ótimas, quando seus veículos conectados atravessam as interseções. Nesse caso, os agentes Veículo tomam como referência a via em que o seu veículo conectado se encontra.

6.5 Alocando Espaços nas Vias

Para notificar todos os responsáveis pelo controle de interseções, uma mensagem de interação contendo o interesse *roadway_space_allocation* é enviada para tais agentes. Essa mensagem é parametrizada com o identificador do agente veículo, rota e os instantes de tempos relativos às travessias de cada componente da rota. Ao receber tal mensagem, os agentes executam o procedimento de alocação de rotas descrito anteriormente.

Sempre que um agente responsável pelo controle de interseção envia uma rota ótima para um agente Veículo, esta está contida em uma mensagem de interação cujo interesse é *calculated_route_to<id. da via>*. Ao receber essa mensagem, o agente Veículo passa a ter conhecimento de uma rota, que deve ser mantida pelo mesmo, até que uma nova requisição de cálculo de rota seja feito pelo agente.

6.6 Agendas de Intervalos de Indicações de Luzes Verdes e o Controle de Interseções com Veículos Conectados

No Capítulo 5, foi apresentada uma proposta de controle de interseções por meio de veículos conectados, quando as sinalizações dessas apresentarem uma ausência de funcionamento. Nesta proposta, um veículo conectado é escolhido como o líder na via onde ele e outros veículos estão trafegando. Com base nisso, o agente desse

veículo conectado assume a responsabilidade de controlar a interseção durante um intervalo de tempo. Após a sinalização semafórica virtual indicar luz verde, tal responsabilidade é transferida para outro agente Veículo, que, por sua vez, está em um veículo conectado cuja via está recebendo luz vermelha da sinalização virtual. Quando isso acontece, os agentes veículo conectado interagem, compartilhando os dados de controle da interseção, de modo que o próximo agente responsável pelo controle da interseção possa mantê-los, enquanto a sinalização semafórica virtual estiver indicando luz vermelha. Juntamente com os dados de controle da interseção, o agente veículo conectado também compartilha as agendas de intervalos de indicações de luzes verdes mantidas por ele. Dessa forma, as agendas de intervalos de luzes verdes podem ser mantidas, sem necessariamente ter uma um agente Sinalização Semafórica responsável em mantê-las.

6.7 Veículos Conectados Cientes de Intervalos de Indicações de Luzes Verdes

Uma vez que os agentes responsáveis pelo controle de uma interseção são cientes dos estados de controle da interseção, eles podem tornar os agentes Veículos cientes dos estados dos intervalos de indicações de luzes verdes. Em outras palavras, os agentes Veículos podem saber quanto tempo falta para terminar ou iniciar um intervalo de indicação de luz verde na via em que ele está. Com essa informação, os agentes Veículo podem orientar os motoristas de seus veículos conectados, quanto a tomada de decisão, no que diz respeito a aumentar ou diminuir a velocidade desses, a fim de alcançar a janela de tempo definida por um intervalo de indicação de luz verde para uma via. Segundo PAIVA [1], tal janela de tempo define uma onda verde.

Para representar esta onda verde, os agentes responsáveis pelo controle de uma interseção usam os seguintes dados: posições geográficas do início das ondas verdes (posição do início das áreas de monitoramento de tráfego), sinais de x , sinais de y e ângulos das vias. Com isso, os agentes escalonam ações periodicamente, de acordo com um parâmetro de periodicidade de atualização das ondas verdes cujo valor é 1 ms. Assim, as posições de início das ondas verdes são atualizadas, bem como, suas velocidades de deslocamento, tempos para os próximos intervalos de indicações de luzes verdes e os tempos de duração.

Embora os agentes responsáveis pelos controles de interseções escalonem periodicamente ações para atualizações de dados referentes ao posicionamento das ondas verdes, isso não é suficiente para manter as atualizações descritas acima. Por isso, sempre que a interseção muda de fase, ou seja, todas as sinalizações semafóricas mudam suas indicações em seus grupos focais, as ondas verdes são reposicionadas.

À medida que as interseções mudam de fase, uma variável de controle da fase em cada agente responsável pelos controles de interseções é incrementada. Sendo mais específico, esta variável é incrementada, após a troca das indicações verdes e vermelhas nos grupos focais das sinalizações semafóricas da interseção, sejam estas reais ou virtuais. Essa variável de controle é de grande importância, pois ela é utilizada para acessar os tamanhos dos intervalos na lista de tamanhos de intervalos mantida pelo agente.

Sempre que os tamanhos dos intervalos de indicações de luzes verdes de uma interseção são modificados em função das flutuações de tráfego, demanda a geração de uma nova agenda de intervalos de indicações de luzes verde na interseção, conforme mencionado antes. Quando isso acontece, a variável é zerada em todos os agentes responsáveis pelo controle da interseção, a fim de que esses agentes acessem corretamente as estradas na nova agenda de intervalos de indicações de luzes verdes. Além disso, sempre que uma sinalização semafórica passa a indicar luz verde em seu grupo focal, o início da onda verde é posicionado no fim da via de entrada, especificamente, sobre a faixa de contenção da via. Por outro lado, sempre que uma sinalização semafórica passa a indicar luz vermelha em seu grupo focal, o início da onda verde é posicionado na posição geográfica do fim da área de monitoramento de tráfego da via.

Para que um agente Veículo se torne ciente do intervalo de indicação de luz verde na via em que seu veículo conectado está trafegando, ele interagem com o agente responsável pelo controle da interseção, enviando uma mensagem de interação cujo interesse é *green_wave_request*. Essa mensagem de interação sempre é enviada, após o veículo conectado atravessar uma interseção e, em seguida, entrar em uma nova via.

Quando o agente responsável pelo controle da interseção recebe uma mensagem de interação, contendo o interesse *green_wave_request*, ele responde com uma mensagem de interação, contendo o interesse *green_wave*. Após ter sido totalmente configurada, a mensagem de interação é enviada para a origem da mensagem recebida.

Por fim, ao receber uma mensagem de interação cujo interesse é *green_wave*, o agente Veículo toma ciência do intervalo de indicação de luz verde da via. Após isso, o agente passa a executar a proposta de FARIA [41].

Para tanto, os agentes Veículo interagem uns com os outros, periodicamente, por meio do envio de mensagens de interação cujo interesse é *hello*, levando em consideração o valor de frequência de envio dessas mensagens [24], que são limitadas à vizinhança dos veículos conectados, conforme os dados utilizados no registro do interesse *hello*. Ao receber a mensagem, os agentes Veículos atualizam suas bases de conhecimento acerca dos veículos conectados ao redor daquele que o embute. Utilizando essa base de conhecimento, os agentes extraem os veículos conectados

imediatamente à frente dos seus e as velocidades dos mesmos.

Capítulo 7

Avaliação Experimental e Resultados

Este capítulo tem como objetivo apresentar as avaliações experimentais relativas às propostas apresentadas por esta tese.

7.1 Metodologia Utilizada

Para se obter os resultados apresentados neste capítulo, foi necessário o uso de ferramentas de software capazes de fornecer subsídios para o desenvolvimento de modelos de redes *ad hoc* veiculares e cenários de uso relacionados às propostas apresentadas anteriormente nos Capítulos 3, 5 e 6. Neste sentido, fez-se o uso de três *frameworks*: Veins [62], Inet [63] e SimuLTE [64]. Esses *frameworks* permitiram a implementação tanto de modelos de redes *ad hoc* veiculares quanto cenários de uso para avaliação das propostas desta tese. Para executar as simulações, este *frameworks* têm como base dois simuladores: Omnet++ [63] e SUMO [65].

Com base nos *frameworks* citados acima, foram desenvolvidos os protocolos de comunicação não somente da RAdNet-VE e da HRAdNet-VE, mas também da RAdNet [40] e de dois modelos básicos de CCN, em que um deles é uma CCN baseada em roteamento reativo de dados (CCN_R) [31] e o outro é uma CCN baseada em roteamento proativo de dados (CCN_P) [33]. Vale ressaltar que essas CCNs, nesta tese, não fornecem serviços de cache de dados, pois os dados das aplicações de sistemas inteligentes propostas nesta tese são sensíveis a atrasos [37]. Esses protocolos de comunicação foram desenvolvidos com o intuito de comparar seus desempenhos com os dos protocolos de comunicação da RAdNet-VE e da HRAdNet-VE. Vale ressaltar que, todos esses protocolos operam no nível da camada de rede.

7.2 Métricas para Medição de Desempenho

Para medir o desempenho dos protocolos de comunicação citadas, foram utilizadas as seguintes métricas:

- **Custo de Mensagens Trafegadas (CMT):** é o total de mensagens recebidas pelos nós (inclusos os nós destino e aqueles que as encaminharam);
- **Latência de Comunicação entre Nós (LCN):** é o tempo entre o envio de uma mensagem da camada de rede por um nó origem até a recepção da mensagem pela camada rede de um nó vizinho. Essa métrica utiliza milissegundos (ms) como unidade de medida;
- **Taxa de Entrega de Dados (TED):** total de mensagens de dados recebidas dividido pelo total de mensagens dados enviadas. O resultado disso é o percentual (%) de entrega de dados;
- **Número de Saltos (NS):** consiste na número de vezes que as mensagens foram encaminhadas pelos nós;
- **Alcance das Mensagens (AM):** consiste na distância que as mensagens percorreram, à medida que foram encaminhadas pelos nós. Essa métrica utiliza metros como unidade de medida;
- **Tempo de propagação de mensagens (TPM):** tempo gasto para uma mensagem alcançar uma determinada distância. Essa métrica utiliza milissegundos (ms) como unidade de medida.

Para avaliar o desempenho do sistema multiagente para controle de tráfego, foi desenvolvido um modelo de sinalização semafórica pré-temporizada, de modo que este pudesse ter seu desempenho comparado com as estratégias adotadas pelo sistema multiagente para controle de tráfego. Para tanto, as seguintes métricas foram utilizadas:

- **Taxa de vazão do sistema (TVS):** número de veículos que alcançaram seus destinos por hora. Essa métrica utiliza veículos por hora (veículos/h) como unidade de medida;
- **Tempo médio de espera (TME):** a média das quantidades máximas de tempo, em segundos (s), que um veículo fica parado. Essa métrica utiliza segundos (s) como unidade de medida;
- **Tempo médio de viagem (TMV):** média dos tempos que os veículos gastam durante o percurso entre a origem de sua viagem e o destino da mesma; Essa métrica utiliza segundos (s) como unidade de medida;

- **Velocidade média (VM):** velocidade média dos veículos, à medida que viajam pela rede viária até alcançarem o destino de suas viagens. Essa métrica utiliza quilômetro por hora (km/h) como unidade de medida.

No que diz respeito à avaliação do desempenho do sistema multiagente para planejamento e orientação de rotas, foram desenvolvidos algoritmos de escalonamento de veículos, a fim de simular as escolhas de caminhos realizadas pelos motoristas (Caminho Espacialmente mais Curto) e planejamento e orientação de rotas baseado nos sistemas atuais navegação (Caminho Temporalmente mais Curto). Para realizar as comparações de desempenho, as seguintes métricas foram utilizadas:

- **Taxa de vazão do sistema (TVS):** número de veículos que alcançaram seus destinos por hora. Essa métrica utiliza veículos por hora (veículos/h) como unidade de medida;
- **Tempo médio de espera (TME):** a média das quantidades máximas de tempo, em segundos (s), que um veículo fica parado. Essa métrica utiliza segundos (s) como unidade de medida;
- **Tempo médio de viagem (TMV):** média dos tempos que os veículos gastam durante o percurso entre a origem de sua viagem e o destino da mesma; Essa métrica utiliza segundos (s) como unidade de medida;
- **Velocidade média (VM):** velocidade média dos veículos, à medida que viajam pela rede viária até alcançarem o destino de suas viagens. Essa métrica utiliza quilômetro por hora (km/h) como unidade de medida.
- **Consumo médio de combustível:** total de combustível gasto. Essa métrica utiliza mililitro (ml) como unidade de medida;
- **Emissões de CO (Monóxido de Carbono) (CO):** total de emissões de monóxido de carbono. Essa métrica utiliza grama (g) como unidade de medida;
- **Emissões de CO₂ (Dióxido de Carbono) (CO₂):** total de emissões de dióxido de carbono. Essa métrica utiliza grama (g) como unidade de medida;
- **Emissões de HC (Hidrocarbonetos) (HC):** total de emissões de hidrocarbonetos. Essa métrica utiliza grama (g) como unidade de medida;
- **Emissões de NOx (Óxidos de Nitrogênio) (NOx):** total de emissões de óxidos de nitrogênio. Essa métrica utiliza grama (g) como unidade de medida;
- **Emissões de PMx (Material Particulado)(PMx):** total de emissões de material particulado. Essa métrica utiliza grama (g) como unidade de medida.

Uma vez que as simulações tiveram seus tempos de duração fixados em 3600 s, os valores relativos às métricas acima foram acumulados e calculados a cada 100 s. Dessa forma, foi possível extrair os resultados que serão apresentados nas Seções 7.3, 7.4, 7.5 e 7.6. Tais resultados são apresentados na forma de valores totais e médios. No que diz respeito aos valores totais, estes são os acumulados dos valores totais de cada intervalo de medição. Acerca dos valores médios, estes são as médias dos valores médios de cada intervalo de medição. Para os valores médios, foi adotado um intervalo de confiança de 95%.

7.3 Avaliando a Rede Ad Hoc Veicular Centrada em Interesses

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos nos primeiros experimentos com a RAdNet-VE e publicados em GONÇALVES *et al.* [39, 52]. Os detalhes sobre as definições dos cenários e configurações dos experimentos podem ser encontrados em GONÇALVES [42], GONÇALVES *et al.* [66].

7.3.1 Análise dos Resultados do Cenário 1

A seguir, a Tabela 7.1 apresenta os resultados dos experimentos do cenário 1 e, em seguida, a Tabela 7.4 apresenta a análise dos mesmos.

Tabela 7.1: Resultados dos experimentos do cenário 1

Métricas	RAdNet-VE	RAdNet	CCN _R	CCN _R
CMT (msgs.)	$2,19 \times 10^5$	$1,12 \times 10^6$	$5,44 \times 10^6$	$1,49 \times 10^7$
LCN (ms)	$20,4 \pm 0,05$	$29,92 \pm 0,05$	$26,24 \pm 0,06$	$46,69 \pm 0,08$
TED (%)	$83,25 \pm 0,25$	$79,19 \pm 0,65$	$84,9 \pm 0,54$	$73,09 \pm 1,57$
NS (saltos)	4	5	4	4
AM (m)	$305,92 \pm 79,58$	$576,39 \pm 113,6$	$293,99 \pm 42,87$	$429,39 \pm 110,67$
TPM (ms)	$229 \pm 40,00$	$231 \pm 40,00$	$237 \pm 30,00$	$252 \pm 30,00$

Tabela 7.2: Análise comparativa entre o desempenho da RAdNet-VE e os das demais redes no cenário 1.

Métricas	RAdNet	CCN _R	CCN _R
CMT (msgs.)	<80,44%	<95,97%	<98,53%
LCN (ms)	<31,81%	<22,25%	<56,3%
TED (%)	>5,12%	<1,11%	>13,9%
NS (saltos)	<20,00%	=	=
AM (m)	<46,92%	>4,05%	<28,75%
TPM (ms)	<0,08%	<3,37%	<9,12%

7.3.2 Análise dos Resultados do Cenário 2

A seguir, a Tabela 7.1 apresenta os resultados dos experimentos do cenário 2 e, em seguida, a Tabela 7.4 apresenta a análise dos mesmos.

Tabela 7.3: Resultados dos experimentos do cenário 2

Métricas	RAdNet-VE	RAdNet	CCN _R	CCN _R
CMT (msgs.)	$7,86 \times 10^6$	$1,06 \times 10^8$	$2,01 \times 10^7$	$1,97 \times 10^7$
LCN (ms)	$2,87 \pm 0,1$	$36,52 \pm 4,0$	$20,01 \pm 1,0$	$23,04 \pm 4,0$
TED (%)	$88,95 \pm 0,4$	$16,81 \pm 0,4$	$18,21 \pm 1,0$	$35,59 \pm 0,15$
NS (saltos)	28	30	29	29
AM (m)	$9957,62 \pm 7,87$	$9983,73 \pm 28,14$	$9932,73 \pm 28,14$	$9937,73 \pm 37,78$
TPM (ms)	$140 \pm 30,00$	$1290 \pm 210,00$	$640 \pm 226,00$	$730 \pm 209,00$

Tabela 7.4: Análise comparativa entre o desempenho da RAdNet-VE e os das demais redes no cenário 2.

Métricas	RAdNet	CCN _R	CCN _R
CMT (msgs.)	<92,58%	<60,89%	<60,1%
LCN (ms)	<92,14%	<85,65%	<87,54%
TED (%)	>429%	>388%	>149%
NS (saltos)	<6,66%	<3,44%	<3,44%
AM (m)	<0,02%	>0,02%	>0,02%
TPM (ms)	<89,14%	<78,12%	<80,82%

7.4 Avaliando a Rede Veicular Heterogênea Centrada em Interesses

Nesta seção, é apresentada a avaliação experimental da HRadNet-VE. Essa avaliação experimental consiste em dois cenários que foram criados com o intuito de comparar o desempenho da HRadNet-VE contra o da RAdNet-VE, CCN_R e CCN_P. Os detalhes sobre esses dois cenários e os parâmetros de rede utilizados nos experimentos podem ser encontrados em GONÇALVES [42].

7.4.1 Análise dos Resultados do Cenário 1

Esta seção tem como objetivo apresentar uma análise comparativa entre HRadNet-VE, RAdNet, CCN_R e CCN_P, tendo como base os resultados obtidos nos experimentos 1, 2 e 3 do cenário 1.

Experimento 1 com Grupo Reativo

A seguir, as Tabelas 7.5, 7.6 e 7.7 apresentam os resultados do grupo reativo e, em seguida, a Tabela 7.8 apresenta a análise comparativa destes.

Tabela 7.5: Resultados do grupo reativo no experimento 1 do cenário 1, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11n

Métricas	HRAAdNet-VE	RAdNet	CCN _R
CMT (msgs.)	$8,52 \times 10^8$	$1,309 \times 10^9$	$1,020 \times 10^9$
LCN (ms)	$24,14 \pm 0,32$	$44,44 \pm 0,39$	$39,53 \pm 0,58$
TED (%)	$92,95 \pm 0,11$	$91,71 \pm 0,1$	$90,46 \pm 0,1$
NS (saltos)	7	7	7
AM (m)	$1346 \pm 17,63$	$1343 \pm 18,61$	$1344 \pm 18,29$
TPM (ms)	$175 \pm 18,61$	$338 \pm 49,65$	$289 \pm 31,03$

Tabela 7.6: Resultados do grupo reativo no experimento 1 do cenário 1, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11p

Métricas	HRAAdNet-VE	RAdNet	CCN _R
CMT (msgs.)	$8,3 \times 10^8$	$1,963 \times 10^9$	$1,513 \times 10^9$
LCN (ms)	$18,9 \pm 0,48$	$25,5 \pm 0,68$	$20,74 \pm 0,55$
TED (%)	$62,44 \pm 1,29$	$47,76 \pm 0,98$	$30,72 \pm 0,65$
NS (saltos)	4	4	4
AM (m)	$1977 \pm 7,51$	$1976 \pm 7,83$	$1977 \pm 7,51$
TPM (ms)	$122 \pm 12,08$	$447 \pm 45,07$	$299 \pm 30,05$

Tabela 7.7: Resultados do grupo reativo no experimento 1 do cenário 1, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão LTE

Métricas	HRAAdNet-VE	RAdNet	CCN _R
CMT (msgs.)	$1,33 \times 10^7$	$2,82 \times 10^7$	$1,36 \times 10^7$
LCN (ms)	$43,3 \pm 0,32$	$44,36 \pm 0,58$	$43,9 \pm 0,58$
TED (%)	$99,79 \pm 0,13$	$99,66 \pm 0,003$	$99,71 \pm 0,003$
NS (saltos)	1	1	1
AM (m)	2500	2500	2500
TPM (ms)	$43,3 \pm 0,32$	$44,36 \pm 0,58$	$43,9 \pm 0,58$

Tabela 7.8: Análise comparativa entre o desempenho da HRAAdNet-VE e os das demais redes do grupo reativo, utilizando os resultados do experimento 1 do cenário 1.

Métricas	IEEE 802.11n		IEEE 802.11p		LTE	
	RAdNet	CCN _R	RAdNet	CCN _R	RAdNet	CCN _R
CMT	<34,9%	<16,47%	<57,7%	<45,14%	<52,83%	<2,2%
LCN	<45,67%	<38,9%	<25,8%	<8,87%	<2,38%	<0,013%
TED	>1,35%	>2,75%	>30,73%	>103,25%	>1,07%	>0,008%
NS	=	=	=	=	=	=
AM	>0,02%	>0,01%	>0,005%	=	=	=
TPM	<48,22%	<39,44%	<72,7%	<59,19%	<1,38%	<0,002%

Experimento 1 com Grupo Proativo

A seguir, as Tabelas 7.9, 7.10 e 7.11 apresentam os resultados do grupo proativo e, em seguida, a Tabela 7.12 apresenta a análise comparativa destes.

Tabela 7.9: Resultados do grupo proativo no experimento 1 do cenário 1, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11n

Métricas	HRAdNet-VE	RAdNet	CCN _P
CMT (msgs.)	$7,14 \times 10^8$	$7,79 \times 10^8$	$7,34 \times 10^8$
LCN (ms)	$9,03 \pm 0,06$	$38,73 \pm 0,39$	$15,5 \pm 0,13$
TED (%)	$98,84 \pm 0,11$	$98,78 \pm 0,11$	$97,79 \pm 0,11$
NS (saltos)	7	7	7
AM (m)	$1348 \pm 16,98$	$1343 \pm 18,61$	$1347 \pm 17,31$
TPM (ms)	$78,00 \pm 3,91$	$301,00 \pm 41,48$	$113,4 \pm 12,08$

Tabela 7.10: Resultados do grupo proativo no experimento 1 do cenário 1, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11p

Métricas	HRAdNet-VE	RAdNet	CCN _P
CMT (msgs.)	$3,51 \times 10^8$	$7,54 \times 10^8$	$6,39 \times 10^8$
LCN (ms)	$13,93 \pm 0,32$	$22,8 \pm 0,62$	$15,12 \pm 0,39$
TED (%)	$86,38 \pm 1,72$	$65,91 \pm 1,07$	$81,94 \pm 1,63$
NS (saltos)	4	4	4
AM (m)	$1978 \pm 7,18$	$1976 \pm 7,83$	$1978 \pm 7,18$
TPM (ms)	$92,94 \pm 9,14$	$178,27 \pm 17,96$	$96,48 \pm 9,79$

Tabela 7.11: Resultados do grupo proativo no experimento 1 do cenário 1, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão LTE

Métricas	HRAdNet-VE	RAdNet	CCN _P
CMT (msgs.)	$1,21 \times 10^7$	$1,69 \times 10^7$	$1,32 \times 10^7$
LCN (ms)	$43,1 \pm 0,58$	$44,8 \pm 0,58$	$44,00 \pm 0,32$
TED (%)	$99,99 \pm 0,006$	$99,91 \pm 0,003$	$99,84 \pm 0,03$
NS (saltos)	1	1	1
AM (m)	2500	2500	2500
TPM (ms)	$43,1 \pm 0,58$	$44,8 \pm 0,58$	$44,00 \pm 0,32$

Tabela 7.12: Análise comparativa entre o desempenho da HRAdNet-VE e os das demais redes do grupo proativo, utilizando os resultados do experimento 1 do cenário 1.

Métricas	IEEE 802.11n		IEEE 802.11p		LTE	
	RAdNet	CCN _P	RAdNet	CCN _P	RAdNet	CCN _P
CMT	<8,34%	<2,72%	<53,44%	<45,07%	<28,4%	<8,33%
LCN	<76,68%	<41,74%	<38,9%	<7,87%	<3,79%	<2,04%
TED	>0,005%	>0,015%	>31,05%	>5,41%	>0,008%	>0,01%
NS	=	=	=	=	=	=
AM	>0,03%	>0,007%	>0,01%	=	=	=
TPM	<74,08%	<30,97%	<47,89%	<3,66%	<1,82%	<0,071%

Experimento 2 com Grupo Reativo

A seguir, as Tabelas 7.13, 7.14 e 7.15 apresentam os resultados do grupo reativo e, em seguida, a Tabela 7.16 apresenta a análise comparativa destes.

Tabela 7.13: Resultados do grupo reativo no experimento 2 do cenário 1, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11n

Métricas	HRAAdNet-VE	RAdNet	CCN _R
CMT (msgs.)	$1,142 \times 10^9$	$3,09 \times 10^9$	$3,02 \times 10^9$
LCN (ms)	25,31 ±0,44	41,12 ±0,65	37,39 ±0,71
TED (%)	91,61 ±0,14	87,5 ±0,13	82,73 ±0,12
NS (saltos)	7	7	7
AM (m)	1346 ±17,63	1344 ±18,29	1344 ±18,29
TPM (ms)	190 ±22,21	329 ±33,97	301 ±35,27

Tabela 7.14: Resultados do grupo reativo no experimento 2 do cenário 1, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11p

Métricas	HRAAdNet-VE	RAdNet	CCN _R
CMT (msgs.)	$1,738 \times 10^9$	$5,93 \times 10^9$	$2,797 \times 10^9$
LCN (ms)	23,02 ±0,58	35,88 ±0,58	37,39 ±0,48
TED (%)	49,31 ±1,04	42,12 ±0,89	28,84 ±0,61
NS (saltos)	4	4	4
AM (m)	1976 ±7,83	1974 ±8,49	1976 ±7,83
TPM (ms)	152 ±8,81	766 ±68,27	690 ±22,53

Tabela 7.15: Resultados do grupo reativo no experimento 2 do cenário 1, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão LTE

Métricas	HRAAdNet-VE	RAdNet	CCN _R
CMT (msgs.)	$2,59 \times 10^7$	$6,04 \times 10^7$	$2,87 \times 10^7$
LCN (ms)	49,1 ±0,68	52,58 ±0,65	50,24 ±0,68
TED (%)	99,24 ±0,25	99,16 ±0,002	98,83 ±0,002
NS (saltos)	1	1	1
AM (m)	2500	2500	2500
TPM (ms)	49,1 ±0,68	52,58 ±0,65	50,24 ±0,68

Tabela 7.16: Análise comparativa entre o desempenho da HRAAdNet-VE e os das demais redes do grupo reativo, utilizando os resultados do experimento 2 do cenário 1.

Métricas	IEEE 802.11n		IEEE 802.11p		LTE	
	RAdNet	CCN _R	RAdNet	CCN _R	RAdNet	CCN _R
CMT	<63,04%	<62,18	<70,69%	<37,86%	<57,11%	<9,75%
LCN	<38,44%	<32,3%	<35,84%	<12,5%	<6,66%	<2,26%
TED	>4,69%	>10,73%	>17,70%	>70,15%	>0,008%	>0,04%
NS	=	=	=	=	=	=
AM	>0,01%	>0,01%	>0,01%	=	=	=
TPM	<42,24%	<36,87%	<80,15%	<77,97%	<6,61%	<2,26%

Experimento 2 com Grupo Proativo

A seguir, as Tabelas 7.17, 7.18 e 7.19 apresentam os resultados do grupo proativo e, em seguida, a Tabela 7.20 apresenta a análise comparativa destes.

Tabela 7.17: Resultados do grupo proativo no experimento 2 do cenário 1, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11n

Métricas	HRAdNet-VE	RAdNet	CCN _P
CMT (msgs.)	$1,076 \times 10^9$	$1,21 \times 10^9$	$1,115 \times 10^9$
LCN (ms)	$9,09 \pm 0,06$	$11,12 \pm 0,006$	$10,7 \pm 0,16$
TED (%)	$98,83 \pm 0,15$	$98,72 \pm 0,15$	$96,56 \pm 0,14$
NS (saltos)	7	7	7
AM (m)	$1349 \pm 16,65$	$1348 \pm 16,98$	$1348 \pm 16,98$
TPM (ms)	$75 \pm 3,26$	$95 \pm 13,39$	$86 \pm 9,79$

Tabela 7.18: Resultados do grupo proativo no experimento 2 do cenário 1, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11p

Métricas	HRAdNet-VE	RAdNet	CCN _P
CMT (msgs.)	$7,49 \times 10^8$	$1,858 \times 10^9$	$1,013 \times 10^9$
LCN (ms)	$12,23 \pm 0,32$	$16,68 \pm 0,42$	$14,29 \pm 0,37$
TED (%)	$84,41 \pm 1,79$	$66,65 \pm 1,41$	$67,15 \pm 1,41$
NS (saltos)	4	4	4
AM (m)	$1978 \pm 7,18$	$1977 \pm 7,51$	$1978 \pm 7,18$
TPM (ms)	$89 \pm 8,81$	$178 \pm 17,96$	$105 \pm 10,45$

Tabela 7.19: Resultados do grupo proativo no experimento 2 do cenário 1, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão LTE

Métricas	HRAdNet-VE	RAdNet	CCN _P
CMT (msgs.)	$1,57 \times 10^7$	$1,9 \times 10^7$	$1,7 \times 10^7$
LCN (ms)	$43,2 \pm 0,58$	$45 \pm 0,68$	$44,6 \pm 0,78$
TED (%)	$99,99 \pm 0,03$	$99,97 \pm 0,009$	$99,93 \pm 0,02$
NS (saltos)	1	1	1
AM (m)	2500	2500	2500
TPM (ms)	$43,2 \pm 0,58$	$45 \pm 0,68$	$44,6 \pm 0,78$

Tabela 7.20: Análise comparativa entre o desempenho da HRAdNet-VE e os das demais redes do grupo proativo, utilizando os resultados do experimento 2 do cenário 1.

Métricas	IEEE 802.11n		IEEE 802.11p		LTE	
	RAdNet	CCN _P	RAdNet	CCN _P	RAdNet	CCN _P
CMT	<11,07%	<3,49%	<59,14%	<25,07%	<17,36%	<11,29%
LCN	<18,25%	<15,04%	<26,67%	<14,41%	<4,22%	<3,36%
TED	>0,01%	>2,35%	>26,64%	>25,70%	>0,002%	>0,006%
NS	=	=	=	=	=	=
AM	>0,007%	>0,007%	>0,005%	=	=	=
TPM	<21,05%	<9,47%	<50%	15,23%	<4,22%	<3,36%

Experimento 3 com Grupo Reativo

A seguir, as Tabelas 7.21, 7.22 e 7.23 apresentam os resultados do grupo reativo e, em seguida, a Tabela 7.24 apresenta a análise comparativa destes.

Tabela 7.21: Resultados do grupo reativo no experimento 3 do cenário 1 utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11n

Métricas	HRAdNet-VE	RAdNet	CCN _R
CMT (msgs.)	$1,981 \times 10^9$	$4,209 \times 10^9$	$3,17 \times 10^9$
LCN (ms)	$27,99 \pm 0,49$	$47,7 \pm 0,89$	$41,12 \pm 0,71$
TED (%)	$91,95 \pm 0,14$	$90,77 \pm 0,13$	$88,83 \pm 0,13$
NS (saltos)	7	7	7
AM (m)	$1566 \pm 11,1$	$1563 \pm 12,08$	$1564 \pm 11,75$
TPM (ms)	$188 \pm 21,88$	$465 \pm 56,83$	$410 \pm 48,01$

Tabela 7.22: Resultados do grupo reativo no experimento 3 do cenário 1, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11p

Métricas	HRAdNet-VE	RAdNet	CCN _R
CMT (msgs.)	$4,115 \times 10^9$	$6,417 \times 10^9$	$4,496 \times 10^9$
LCN (ms)	$21,12 \pm 0,52$	$43,61 \pm 0,68$	$39,61 \pm 0,48$
TED (%)	$49,35 \pm 1,04$	$31,7 \pm 0,74$	$20,41 \pm 0,43$
NS (saltos)	4	4	4
AM (m)	$1987 \pm 4,24$	$1983 \pm 5,55$	$1984 \pm 5,22$
TPM (ms)	$160 \pm 11,1$	$947 \pm 8,16$	$781 \pm 6,85$

Tabela 7.23: Resultados do grupo reativo no experimento 3 do cenário 1, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão LTE

Métricas	HRAdNet-VE	RAdNet	CCN _R
CMT (msgs.)	$3,89 \times 10^7$	$8,19 \times 10^7$	$4,28 \times 10^7$
LCN (ms)	$51,4 \pm 0,78$	$54,6 \pm 0,65$	$52,28 \pm 0,65$
TED (%)	$97,95 \pm 0,32$	$96,91 \pm 0,32$	$97,86 \pm 0,32$
NS (saltos)	1	1	1
AM (m)	2500	2500	2500
TPM (ms)	$51,4 \pm 0,78$	$54,6 \pm 0,65$	$52,28 \pm 0,65$

Tabela 7.24: Análise comparativa entre desempenho da HRAdNet-VE e os das demais redes do grupo reativo, utilizando os resultados do experimento 3 do cenário 1.

Métricas	IEEE 802.11n		IEEE 802.11p		LTE	
	RAdNet	CCN _R	RAdNet	CCN _R	RAdNet	CCN _R
CMT	<52,93%	<37,50%	<35,87%	<8,47%	<52,5%	<9,11%
LCN	<41,03%	<31,93%	<51,57%	<46,68%	<5,86%	<1,68%
TED	>1,29%	>3,51%	>55,67%	>141,79%	>1,07%	>0,009%
NS	=	=	=	=	=	=
AM	>0,01%	>0,01%	>0,02%	>0,01%	=	=
TPM	<61,23%	<54,14%	<83,10%	<79,51%	<0,003%	<0,03%

Experimento 3 com Grupo Proativo

A seguir, as Tabelas 7.25, 7.26 e 7.27 apresentam os resultados do grupo proativo e, em seguida, a Tabela 7.28 apresenta a análise comparativa destes.

Tabela 7.25: Resultados do grupo proativo no experimento 3 do cenário 1, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11n

Métricas	HRAAdNet-VE	RAdNet	CCN _P
CMT (msgs.)	$1,806 \times 10^9$	$2,064 \times 10^9$	$2,046 \times 10^9$
LCN (ms)	$9,1 \pm 0,13$	$11,17 \pm 0,19$	$11,03 \pm 0,45$
TED (%)	$98,36 \pm 0,15$	$97,82 \pm 0,15$	$96,38 \pm 0,14$
NS (saltos)	7	7	7
AM (m)	$1569 \pm 10,12$	$1568 \pm 10,45$	$1568 \pm 10,45$
TPM (ms)	$94 \pm 10,77$	$159 \pm 18,61$	$97 \pm 11,1$

Tabela 7.26: Resultados do grupo proativo no experimento 3 do cenário 1, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11p

Métricas	HRAAdNet-VE	RAdNet	CCN _P
CMT (msgs.)	$1,657 \times 10^9$	$3,506 \times 10^9$	$2,106 \times 10^9$
LCN (ms)	$14,16 \pm 0,35$	$23,18 \pm 0,58$	$19,85 \pm 0,48$
TED (%)	$83,39 \pm 1,77$	$66,88 \pm 1,42$	$72,63 \pm 1,54$
NS (saltos)	4	4	4
AM (m)	$1988 \pm 3,91$	$1986 \pm 4,57$	$1987 \pm 14,24$
TPM (ms)	$74,11 \pm 6,53$	$188 \pm 16,55$	$95,67 \pm 8,49$

Tabela 7.27: Resultados do grupo proativo no experimento 3 do cenário 1, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão LTE

Métricas	HRAAdNet-VE	RAdNet	CCN _P
CMT (msgs.)	$3,63 \times 10^7$	$4,83 \times 10^7$	$4,02 \times 10^7$
LCN (ms)	$43,6 \pm 0,58$	$47,8 \pm 0,78$	$44,3 \pm 0,65$
TED (%)	$99,96 \pm 0,03$	$99,87 \pm 0,03$	$99,89 \pm 0,03$
NS (saltos)	1	1	1
AM (m)	2500	2500	2500
TPM (ms)	$43,6 \pm 0,58$	$47,8 \pm 0,78$	$44,3 \pm 0,65$

Tabela 7.28: Análise comparativa entre desempenho da HRAAdNet-VE e os das demais redes do grupo proativo, utilizando os resultados do experimento 3 do cenário 1.

Métricas	IEEE 802.11n		IEEE 802.11p		LTE	
	RAdNet	CCN _P	RAdNet	CCN _P	RAdNet	CCN _P
CMT	<12,5%	<11,73%	<52,73%	<21,32%	<24,84%	<9,7%
LCN	<18,53%	<17,49%	<38,91%	<28,66%	<8,78%	<1,58%
TED	>0,05%	>2,05%	>24,68%	>14,81%	>0,009%	>0,007%
NS	=	=	=	=	=	=
AM	<0,006%	<0,006%	<0,001%	<0,005%	=	=
TPM	<40,88%	<3,09%	<60,57%	<22,53	<24,93	<10%

7.4.2 Análise dos Resultados do Cenário 2

Esta seção tem como objetivo apresentar uma análise comparativa entre HRAAdNet-VE, RAdNet, CCN_R e CCN_P, tendo como base os resultados obtidos nos experimentos 1, 2 e 3 do cenário 2.

Experimento 1 com Grupo Reativo

A seguir, as Tabelas 7.29, 7.30 e 7.31 apresentam os resultados do grupo reativo e, em seguida, a Tabela 7.32 apresenta a análise comparativa destes.

Tabela 7.29: Resultados do grupo reativo no experimento 1 do cenário 2, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11n

Métricas	HRAdNet-VE	RAdNet	CCN _R
CMT	$9,5 \times 10^8$	$1,772 \times 10^9$	$1,245 \times 10^9$
LCN	$28,53 \pm 0,32$	$97,04 \pm 0,39$	$65,88 \pm 0,58$
TED	$91,95 \pm 0,1$	$85,6 \pm 0,1$	$88,19 \pm 0,1$
NS	7	7	7
AM	$1346 \pm 17,63$	$1335 \pm 21,23$	$1340 \pm 19,59$
TPM	$197 \pm 18,61$	$800 \pm 85,91$	$487 \pm 52,26$

Tabela 7.30: Resultados do grupo reativo no experimento 1 do cenário 2, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11p

Métricas	HRAdNet-VE	RAdNet	CCN _R
CMT (msgs.)	$8,35 \times 10^8$	$1,963 \times 10^9$	$1,513 \times 10^9$
LCN (ms)	$18,93 \pm 0,52$	$25,5 \pm 0,68$	$21,05 \pm 0,62$
TED (%)	$61,63 \pm 1,3$	$46,85 \pm 0,93$	$30,22 \pm 0,6$
NS (saltos)	4	4	4
AM (m)	$1977 \pm 7,51$	$1976 \pm 7,83$	$1977 \pm 7,51$
TPM (ms)	$122 \pm 12,41$	$447 \pm 45,07$	$300 \pm 31,68$

Tabela 7.31: Resultados do grupo reativo no experimento 1 do cenário 2, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão LTE

Métricas	HRAdNet-VE	RAdNet	CCN _R
CMT (msgs.)	$1,53 \times 10^7$	$3,6 \times 10^7$	$1,74 \times 10^7$
LCN (ms)	$43,56 \pm 0,32$	$54,03 \pm 0,58$	$51,18 \pm 0,58$
TED (%)	$98,81 \pm 0,13$	$98,68 \pm 0,003$	$98,73 \pm 0,003$
NS (saltos)	1	1	1
AM (m)	2500	2500	2500
TPM (ms)	$43,56 \pm 0,32$	$54,03 \pm 0,58$	$51,18 \pm 0,58$

Tabela 7.32: Análise comparativa entre o desempenho da HRAdNet-VE e os das demais redes do grupo reativo, utilizando os resultados do experimento 1.

Métricas	IEEE 802.11n		IEEE 802.11p		LTE	
	RAdNet	CCN _R	RAdNet	CCN _R	RAdNet	CCN _R
CMT	<46,38%	<23,69%	<57,89%	<44,81%	<57,5%	<12,06%
LCN	<70,59%	<56,69%	<25,76%	<10,07%	<19,37%	<14,88%
TED	>7,41%	>4,26%	>31,54%	>103,93%	>0,01%	>0,008%
NS	=	=	=	=	=	=
AM	>0,08%	>0,04%	>0,005%	=	=	=
TPM	<75,37%	<59,54%	<72,7%	<59,33%	<9,12%	<4,06%

Experimento 1 com Grupo Proativo

A seguir, as Tabelas 7.33, 7.34 e 7.35 apresentam os resultados do grupo proativo e, em seguida, a Tabela 7.36 apresenta a análise comparativa destes.

Tabela 7.33: Resultados do grupo proativo no experimento 1 do cenário 2, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11n

Métricas	HRAdNet-VE	RAdNet	CCN _P
CMT (msgs.)	$8,23 \times 10^8$	$9,14 \times 10^8$	$7,34 \times 10^8$
LCN (ms)	$9,4 \pm 0,06$	$55,9 \pm 0,97$	$23,57 \pm 0,19$
TED (%)	$97,55 \pm 0,11$	$90,73 \pm 0,1$	$90,27 \pm 0,1$
NS (saltos)	7	7	7
AM (m)	$1349 \pm 16,51$	$1341 \pm 19,27$	$1346 \pm 17,63$
TPM (ms)	$98,62 \pm 10,45$	$403 \pm 43,11$	$176,4 \pm 18,94$

Tabela 7.34: Resultados do grupo proativo no experimento 1 do cenário 2, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11p

Métricas	HRAdNet-VE	RAdNet	CCN _P
CMT (msgs.)	$3,52 \times 10^8$	$7,58 \times 10^8$	$6,39 \times 10^8$
LCN (ms)	$14,33 \pm 0,39$	$22,9 \pm 0,62$	$16,49 \pm 0,42$
TED (%)	$85,51 \pm 1,7$	$63,24 \pm 1,23$	$80,94 \pm 1,6$
NS (saltos)	4	4	4
AM (m)	$1978 \pm 7,18$	$1976 \pm 7,83$	$1977 \pm 7,51$
TPM (ms)	$93,23 \pm 9,47$	$180 \pm 18,61$	$97,33 \pm 9,79$

Tabela 7.35: Resultados do grupo proativo no experimento 1 do cenário 2, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão LTE

Métricas	HRAdNet-VE	RAdNet	CCN _P
CMT (msgs.)	$1,5 \times 10^7$	$2,1 \times 10^7$	$1,6 \times 10^7$
LCN (ms)	$43,44 \pm 0,58$	$44,96 \pm 0,58$	$43,48 \pm 0,65$
TED (%)	$99 \pm 0,3$	$98,92 \pm 0,3$	$98,85 \pm 0,3$
NS (saltos)	1	1	1
AM (m)	2500	2500	2500
TPM (ms)	$43,44 \pm 0,58$	$44,96 \pm 0,58$	$43,48 \pm 0,65$

Tabela 7.36: Análise comparativa entre o desempenho da HRAdNet-VE e os das demais redes do grupo proativo, utilizando os resultados do experimento 1.

Métricas	IEEE 802.11n		IEEE 802.11p		LTE	
	RAdNet	CCN _P	RAdNet	CCN _P	RAdNet	CCN _P
CMT	<9,95%	>12,12%	<53,56%	<44,91%	<57,5%	<12,06%
LCN	<83,18%	<60,11%	<37,42%	<13,09%	<3,38%	<0,009%
TED	>7,51%	>8,06%	>35,21%	>5,64%	>0,008%	>0,01%
NS	=	=	=	=	=	=
AM	>0,05%	>0,02%	>0,01%	>0,005%	=	=
TPM	<75,52%	<44,09%	<48,2%	<4,21%	<3,38%	<1,06%

Experimento 2 com Grupo Reativo

A seguir, as Tabelas 7.37, 7.38 e 7.39 apresentam os resultados do grupo reativo e, em seguida, a Tabela 7.40 apresenta a análise comparativa destes.

Tabela 7.37: Resultados do grupo reativo no experimento 2 do cenário 2, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11n

Métricas	HRAdNet-VE	RAdNet	CCN _R
CMT (msgs.)	$1,286 \times 10^9$	$6,31 \times 10^9$	$6,12 \times 10^9$
LCN (ms)	$29,95 \pm 0,52$	$112 \pm 1,95$	$88,21 \pm 0,71$
TED (%)	$90,75 \pm 0,13$	$80,7 \pm 0,12$	$80,89 \pm 0,12$
NS (saltos)	7	7	7
AM (m)	$1345 \pm 17,96$	$1333 \pm 21,88$	$1336 \pm 20,9$
TPM (ms)	$239 \pm 27,76$	$898 \pm 105,18$	$682 \pm 80,68$

Tabela 7.38: Resultados do grupo reativo no experimento 2 do cenário 2, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11p

Métricas	HRAdNet-VE	RAdNet	CCN _R
CMT (msgs.)	$1,738 \times 10^9$	$5,93 \times 10^9$	$2,797 \times 10^9$
LCN (ms)	$23,02 \pm 0,58$	$35,88 \pm 0,58$	$26,31 \pm 0,48$
TED (%)	$49,31 \pm 1,04$	$42,12 \pm 0,89$	$28,84 \pm 0,61$
NS (saltos)	4	4	4
AM (m)	$1976 \pm 7,83$	$1974 \pm 8,49$	$1976 \pm 7,83$
TPM (ms)	$152 \pm 8,81$	$766 \pm 68,27$	$690 \pm 22,53$

Tabela 7.39: Resultados do grupo reativo no experimento 2 do cenário 2, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão LTE

Métricas	HRAdNet-VE	RAdNet	CCN _R
CMT (msgs.)	$3,22 \times 10^7$	$8,02 \times 10^7$	$3,4 \times 10^7$
LCN (ms)	$50,4 \pm 0,68$	$61,34 \pm 0,65$	$52,6 \pm 0,65$
TED (%)	$98,14 \pm 0,03$	$97,97 \pm 0,03$	$98,01 \pm 0,03$
NS (saltos)	1	1	1
AM (m)	2500	2500	2500
TPM (ms)	$50,4 \pm 0,68$	$61,34 \pm 0,65$	$52,6 \pm 0,65$

Tabela 7.40: Análise comparativa entre o desempenho da HRAdNet-VE e os desempenhos das demais redes do grupo reativo, utilizando os dados obtidos no experimento 2 do cenário 2.

Métricas	IEEE 802.11n		IEEE 802.11p		LTE	
	RAdNet	CCN _R	RAdNet	CCN _R	RAdNet	CCN _R
CMT	<79,61%	<78,98%	<70,79%	<37,86%	<59,85%	<5,29%
LCN	<73,25%	<66,04%	<35,84%	<12,5	<17,83%	<4,18%
TED	>12,45%	>12,21%	>17,07%	>70,97%	>0,01%	>0,01%
NS	=	=	=	=	=	=
AM	>0,09%	>0,06%	>0,01%	=	=	=
TPM	<73,38%	<64,95%	<80,15%	<77,97%	<17,83%	<4,18%

Experimento 2 com Grupo Proativo

A seguir, as Tabelas 7.41, 7.42 e 7.43 apresentam os resultados do grupo proativo e, em seguida, a Tabela 7.44 apresenta a análise comparativa destes.

Tabela 7.41: Resultados do grupo proativo no experimento 2 do cenário 2, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11n

Métricas	HRAdNet-VE	RAdNet	CCN _P
CMT (msgs.)	$1,121 \times 10^9$	$1,493 \times 10^9$	$1,235 \times 10^9$
LCN (ms)	$9,6 \pm 0,16$	$60,24 \pm 1,04$	$25,00 \pm 0,42$
TED (%)	$97,94 \pm 0,15$	$92,61 \pm 0,14$	$96,56 \pm 0,14$
NS (saltos)	7	7	7
AM (m)	$1349 \pm 16,65$	$1341 \pm 19,27$	$1346 \pm 17,63$
TPM (ms)	$96,2 \pm 4,63$	$450 \pm 52,59$	$196 \pm 1,95$

Tabela 7.42: Resultados do grupo proativo no experimento 2 do cenário 2, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11p

Métricas	HRAdNet-VE	RAdNet	CCN _P
CMT (msgs.)	$7,49 \times 10^8$	$1,858 \times 10^9$	$1,013 \times 10^9$
LCN (ms)	$12,4 \pm 0,32$	$16,69 \pm 0,42$	$15,18 \pm 0,39$
TED (%)	$84,31 \pm 1,79$	$66,48 \pm 1,41$	$96,56 \pm 1,41$
NS (saltos)	4	4	4
AM (m)	$1978 \pm 7,18$	$1977 \pm 7,51$	$1978 \pm 7,18$
TPM (ms)	$89 \pm 8,85$	$178 \pm 18,29$	$105 \pm 10,45$

Tabela 7.43: Resultados do grupo proativo no experimento 2 do cenário 2, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão LTE

Métricas	HRAdNet-VE	RAdNet	CCN _P
CMT (msgs.)	$1,94 \times 10^7$	$2,25 \times 10^7$	$2,07 \times 10^7$
LCN (ms)	46,2 ±0,65	60 ±0,68	51 ±0,71
TED (%)	99,00 ±0,03	98,94 ±0,03	98,98 ±1,41
NS (saltos)	1	1	1
AM (m)	2500	2500	2500
TPM (ms)	46,2 ±0,65	60 ±0,68	51 ±0,71

Tabela 7.44: Análise comparativa entre o desempenho da HRAdNet-VE e os desempenhos das demais redes do grupo proativo, utilizando os dados obtidos no experimento 2 do cenário 2.

Métricas	IEEE 802.11n		IEEE 802.11p		LTE	
	RAdNet	CCN _P	RAdNet	CCN _P	RAdNet	CCN _P
CMT	<24,9%	<9,23%	<59,68%	<26,06%	<13,77%	<6,28%
LCN	<84,06%	<61,6%	<25,7%	<25,68%	<23%	<9,41%
TED	>5,53%	>1,22%	>26,82%	>20,43%	>0,006%	>0,002%
NS	=	=	=	=	=	=
AM	>0,005%	>0,02%	>0,005%	=	=	=
TPM	<78,62%	<50,91%	<50%	<15,23%	<23%	<9,41%

Experimento 3 com Grupo Reativo

A seguir, as Tabelas 7.45, 7.46 e 7.47 apresentam os resultados do grupo reativo e, em seguida, a Tabela 7.48 apresenta a análise comparativa destes.

Tabela 7.45: Resultados do grupo reativo no experimento 3 do cenário 2, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11n

Métricas	HRAdNet-VE	RAdNet	CCN _R
CMT (msgs.)	$2,288 \times 10^9$	$8,439 \times 10^9$	$5,83 \times 10^9$
LCN (ms)	33,08 ±0,58	128 ±2,28	64,43 ±1,11
TED (%)	91,12 ±0,14	86,64 ±0,13	84,96 ±0,13
NS (saltos)	7	7	7
AM (m)	1575 ±8,16	1560 ±13,06	1570 ±9,79
TPM (ms)	193 ±22,53	1115 ±130,33	592 ±69,25

Tabela 7.46: Resultados do grupo reativo no experimento 3 do cenário 2, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11p

Métricas	HRAdNet-VE	RAdNet	CCN _R
CMT (msgs.)	$4,115 \times 10^9$	$6,417 \times 10^9$	$4,496 \times 10^9$
LCN (ms)	21,12 ±0,52	43,61 ±0,58	39,61 ±0,48
TED (%)	49,35 ±0,96	31,5 ±0,71	20,41 ±0,43
NS (saltos)	4	4	4
AM (m)	1987 ±4,24	1983 ±5,55	1984 ±5,22
TPM (ms)	160 ±11,1	974 ±8,16	781 ±6,85

Tabela 7.47: Resultados do grupo reativo no experimento 3 do cenário 2, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão LTE

Métricas	HRAdNet-VE	RAdNet	CCN _R
CMT (msgs.)	$4,69 \times 10^7$	$1,09 \times 10^8$	$5,91 \times 10^7$
LCN (ms)	64,71 \pm 0, 97	79,38 \pm 0, 97	69,53 \pm 0, 97
TED (%)	97,93 \pm 0, 32	97,86 \pm 0, 32	97,23 \pm 0, 32
NS (saltos)	1	1	1
AM (m)	2500	2500	2500
TPM (ms)	64,71 \pm 0, 97	79,38 \pm 0, 97	69,53 \pm 0, 97

Tabela 7.48: Análise comparativa entre o desempenho da HRAdNet-VE e os desempenhos das demais redes do grupo reativo, utilizando os dados obtidos no experimento 3 do cenário 2.

Métricas	IEEE 802.11n		IEEE 802.11p		LTE	
	RAdNet	CCN _R	RAdNet	CCN _R	RAdNet	CCN _R
CMT	<72,88%	<60,75%	<35,87%	<8,47%	<52,5%	<9,32%
LCN	<74,15%	<48,65%	<51,57%	<46,68%	<18,48%	<6,93%
TED	>5,17%	>7,25%	>56,66%	>141,17%	>0,007%	>0,07%
NS	=	=	=	=	=	=
AM	>0,09%	>0,03%	>0,02%	>0,01%	=	=
TPM	<82,69%	<67,39%	<83,1%	<79,51%	<18,48%	<6,93%

Experimento 3 com Grupo Proativo

A seguir, as Tabelas 7.49, 7.50 e 7.51 apresentam os resultados do grupo reativo e, em seguida, a Tabela 7.52 apresenta a análise comparativa destes.

Tabela 7.49: Resultados do grupo proativo no experimento 3 do cenário 2, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11n

Métricas	HRAdNet-VE	RAdNet	CCN _P
CMT (msgs.)	$4,69 \times 10^9$	$1,09 \times 10^9$	$5,91 \times 10^9$
LCN (ms)	9,21 \pm 0, 13	95,82 \pm 1, 66	40,47 \pm 0, 71
TED (%)	97,02 \pm 0, 14	77,65 \pm 0, 11	79,29 \pm 0, 11
NS (saltos)	7	7	7
AM (m)	1579 \pm 6, 85	1565 \pm 11, 43	1574 \pm 8, 49
TPM (ms)	116 \pm 13, 39	825 \pm 96, 69	449 \pm 52, 59

Tabela 7.50: Resultados do grupo proativo no experimento 3 do cenário 2, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11p

Métricas	HRAdNet-VE	RAdNet	CCN _P
CMT (msgs.)	$1,657 \times 10^9$	$3,506 \times 10^9$	$2,106 \times 10^9$
LCN (ms)	14,36 \pm 0, 37	23,68 \pm 0, 58	18,85 \pm 0, 48
TED (%)	83,39 \pm 1, 75	66,71 \pm 1, 41	72,63 \pm 1, 5
NS (saltos)	4	4	4
AM (m)	1988 \pm 3, 91	1986 \pm 4, 57	1987 \pm 4, 24
TPM (ms)	74,11 \pm 6, 53	188 \pm 16, 65	95,97 \pm 8, 49

Tabela 7.51: Resultados do grupo proativo no experimento 3 do cenário 2, utilizando interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas no padrão LTE

Métricas	HRAAdNet-VE	RAdNet	CCN _P
CMT (msgs.)	$3,63 \times 10^7$	$6,31 \times 10^7$	$4,72 \times 10^7$
LCN (ms)	$44,32 \pm 0,58$	$66,86 \pm 0,78$	$49,71 \pm 0,658$
TED (%)	$98,95 \pm 0,03$	$97,88 \pm 0,03$	$97,93 \pm 0,03$
NS (saltos)	1	1	1
AM (m)	2500	2500	2500
TPM (ms)	$44,32 \pm 0,58$	$66,86 \pm 0,78$	$49,71 \pm 0,658$

Tabela 7.52: Análise comparativa entre o desempenho da HRAAdNet-VE e os desempenhos das demais redes do grupo proativo, utilizando os dados obtidos no experimento 3 do cenário 2.

Métricas	IEEE 802.11n		IEEE 802.11p		LTE	
	RAdNet	CCN _P	RAdNet	CCN _P	RAdNet	CCN _P
CMT	<27,52%	<25,96%	<52,73%	<21,32%	<27,57%	<3,17%
LCN	<90,38%	<77,24%	<39,35%	<27,65%	<33,71%	<10,84%
TED	>24,94%	>22,36%	>25%	>14,81%	>1,09%	>1,04%
NS	=	=	=	=	=	=
AM	>0,08%	>0,03%	>0,01%	>0,005%	=	=
TPM	<85,93%	<0,25,83%	<60,57%	<22,45%	<33,71%	<10,84%

7.5 Avaliando as Estratégias de Controle de Tráfego

Nesta seção, é apresentada a avaliação experimental acerca do sistema multiagente de controle de tráfego. Os detalhes relativos às definições dos cenários de avaliação experimental e configurações dos experimentes podem ser encontrados em [42].

7.5.1 Análise dos Resultados do Cenário 1

Esta seção tem como objetivo apresentar os resultados obtidos por meio dos experimentos 1, 2 e 3 do cenário 1, assim como as análises comparativas dos mesmos.

Experimento 1

A seguir, a Tabela 7.53 apresenta os resultados dos experimento 1 do cenário 1 e, em seguida, a Tabela 7.54 apresenta a análise dos mesmos.

Tabela 7.53: Desempenhos do sistema de controle de tráfego baseado em sinalizações semafóricas pré-temporizadas, $SMER_I$ e $SMER_{I+C}$ no experimento 1 do cenário 1.

Métricas	Pré-Temp.	$SMER_I$			$SMER_{I+C}$		
		18	24	30	18	24	30
TVS (veic./h)	3969	4163	4175	4200	4243	4262	4280
TME (s)	14,67 \pm 0,55	14,55 \pm 0,51	13,58 \pm 0,51	12,61 \pm 0,49	14,01 \pm 0,48	13,1 \pm 0,48	12,21 \pm 0,47
TMV (s)	262,91 \pm 9,89	266,92 \pm 7,74	265,83 \pm 7,51	261,8 \pm 7,42	259,77 \pm 6,8	257,23 \pm 6,79	254,00 \pm 6,62
VM (km/h)	21,01 \pm 0,32	20,92 \pm 0,32	20,65 \pm 0,32	21,18 \pm 0,32	21,21 \pm 0,48	22,06 \pm 0,48	22,97 \pm 0,48

Tabela 7.54: Comparação dos desempenhos de $SMER_I$ e $SMER_{I+C}$ contra o desempenho do sistema de controle de tráfego baseado em sinalizações semafóricas pré-temporizadas, utilizando os resultados obtidos no experimento 1 do cenário 1.

Métricas	$SMER_I$			$SMER_{I+C}$		
	18	24	30	18	24	30
TVS	>4,88%	>5,19%	>5,82%	>6,9%	>7,38%	>7,83%
TME	<0,08%	<7,43%	<14,04%	<4,49%	<10,7%	<16,76%
TMV	>1,52%	>1,11%	<0,04%	<1,19%	<2,26%	<3,38%
VM	<0,04%	<1,71%	>0,08%	>0,09%	>4,99%	>9,32%

Experimento 2

A seguir, a Tabela 7.55 apresenta os resultados dos experimento 2 do cenário 1 e, em seguida, a Tabela 7.56 apresenta a análise dos mesmos.

Tabela 7.55: Resultados obtidos com o sistema de controle de tráfego baseado em sinalizações semafóricas pré-temporizadas, $SMER_I$ e $SMER_{I+C}$ no experimento 2 do cenário 1.

Métricas	Pré-Temp.	$SMER_I$			$SMER_{I+C}$		
		18	24	30	18	24	30
TVS (veic./h)	5378	5531	5545	5735	5958	5973	6024
TME (s)	29,12 \pm 2,11	28,09 \pm 1,92	26,33 \pm 1,88	24,59 \pm 1,85	26,02 \pm 1,86	25,24 \pm 1,83	23,85 \pm 1,79
TMV (s)	392,04 \pm 36,32	361,61 \pm 25,15	354,3 \pm 23,51	347,00 \pm 22,43	370,8 \pm 26,47	350,2 \pm 24,26	340,00 \pm 21,93
VM (Km/h)	14,24 \pm 1,21	14,17 \pm 1,08	14,82 \pm 1,07	15,53 \pm 1,05	15,45 \pm 1,1	15,82 \pm 1,08	16,01 \pm 1,07

Tabela 7.56: Comparação dos desempenhos de $SMER_I$ e $SMER_{I+C}$ contra o desempenho do sistema de controle de tráfego baseado em sinalizações semafóricas pré-temporizadas, utilizando os resultados obtidos no experimento 2 do cenário 1.

Métricas	$SMER_I$			$SMER_{I+C}$		
	18	24	30	18	24	30
TVS	>2,84%	>3,1%	>6,63%	>10,04%	>11,06%	>12,01%
TME	<3,35%	<9,58%	<15,55%	<10,64%	<13,32%	<18,09%
TMV	<7,76%	<9,03%	<11,48%	<5,4%	<10,66%	<13,26%
VM	>0,04%	>4,07%	>9,05%	>8,49%	>11,09%	<12,42%

Experimento 3

A seguir, a Tabela 7.57 apresenta os resultados dos experimento 3 do cenário 1 e, em seguida, a Tabela 7.58 apresenta a análise dos mesmos.

Tabela 7.57: Resultados obtidos com o sistema de controle de tráfego baseado em sinalizações semafóricas pré-temporizadas, $SMER_I$ e $SMER_{I+C}$ no experimento 3 do cenário 1.

Métricas	Pré-Temp.	$SMER_I$			$SMER_{I+C}$		
		18	24	30	18	24	30
TVS (veic./h)	4404	4852	5087	5557	5252	5482	5805
TME (s)	39,28 ±4,65	29,62 ±1,07	26,84 ±1,05	25,17 ±1,03	24,35 ±1,13	21,62 ±1,11	20,08 ±1,07
TMV (s)	670,50 ±73,82	533,14 ±44,75	522,96 ±42,46	509,20 ±40,5	533,86 ±44,09	518,62 ±41,81	500,11 ±39,85
VM (Km/h)	9,06 ±1,3	12,29 ±1,3	12,41 ±1,3	12,91 ±1,3	13,05 ±1,63	13,17 ±1,63	13,43 ±1,63

Tabela 7.58: Comparação dos desempenhos de $SMER_I$ e $SMER_{I+C}$ contra o desempenho do sistema de controle de tráfego baseado em sinalizações semafóricas pré-temporizadas, utilizando os resultados obtidos no experimento 3 do cenário 1.

Métricas	$SMER_I$			$SMER_{I+C}$		
	18	24	30	18	24	30
TVS	>10,17%	>15,5%	>26,18%	>19,25%	>24,47%	>31,81%
TME	<24,59%	<31,67%	<35,92%	<38,00%	<44,95%	<48,87%
TMV	<20,48%	<22,00%	<24,05%	<20,37%	<22,65%	<25,41%
VM	>35,65%	>36,97%	>42,49%	>44,03%	>45,36%	>48,23%

7.5.2 Análise dos Resultados do Cenário 2

Analisando as Tabelas 7.54, 7.56 e 7.56, foi possível identificar que os melhores resultados de $SMER_I$ e $SMER_{I+C}$ foram obtidos, utilizando números de obtenções de quantidade de veículos iguais a 30. Esses resultados, por sua vez, serão comparados com os resultados dos experimentos 1, 2 e 3 do cenário 2.

Para evitar qualquer dúvida na leitura dos resultados, os mesmos foram separados, de acordo com os cenários em que foram obtidos. Para tanto, os nomes $SMER_I$ e $SMER_{I+C}$ receberam sobrescritos, que são os números de cada um dos cenários definidos para a avaliação do sistema multiagente de controle de tráfego.

Experimento 1

A seguir, a Tabela 7.59 apresenta os resultados dos experimento 1 do cenário 2 e, em seguida, a Tabela 7.60 apresenta a análise dos mesmos.

Tabela 7.59: Resultados obtidos com $SMER_I^2$ e $SMER_{I+C}^2$ no experimento 1 do cenário 2.

Métricas	Cenário 1		Cenário 2	
	$SMER_I^1$	$SMER_{I+C}^1$	$SMER_I^2$	$SMER_{I+C}^2$
TVS (veic./h)	4200	4280	3853	4116
TME (s)	12,61 \pm 0,49	12,21 \pm 0,47	14,89 \pm 0,65	13,13 \pm 0,5
TMV (s)	261,96 \pm 7,42	254,00 \pm 6,62	288,69 \pm 8,51	284,01 \pm 6,88
VM (Km/h)	21,18 \pm 0,38	22,97 \pm 0,48	19,93 \pm 0,48	20,73 \pm 0,68

Tabela 7.60: Comparação dos desempenhos de $SMER_I^2$ e $SMER_{I+C}^2$ contra os desempenhos de $SMER_I^1$ e $SMER_{I+C}^1$, utilizando os resultados obtidos no experimento 1 do cenário 1.

Métricas	$SMER_I^2$	$SMER_{I+C}^2$
TVS	<8,26%	<3,83%
TME	>18,08%	>7,53%
TMV	>10,20%	>11,81%
VM	<5,90%	<9,75%

Experimento 2

A seguir, a Tabela 7.61 apresenta os resultados dos experimento 2 do cenário 2 e, em seguida, a Tabela 7.62 apresenta a análise dos mesmos.

Tabela 7.61: Resultados obtidos com $SMER_I^2$ e $SMER_{I+C}^2$ no experimento 2 do cenário 2.

Métricas	Cenário 1		Cenário 2	
	$SMER_I^1$	$SMER_{I+C}^1$	$SMER_I^2$	$SMER_{I+C}^2$
TVS (veic./h)	5735	6024	5382	5662
TME (s)	24,59 \pm 1,85	23,85 \pm 1,79	29 \pm 1,99	25,05 \pm 1,96
TMV (s)	347,00 \pm 22,33	340,00 \pm 21,93	374,86 \pm 24,01	353,5 \pm 23,19
VM (Km/h)	15,53 \pm 1,05	16,01 \pm 1,07	14,91 \pm 1,3	15,18 \pm 1,27

Tabela 7.62: Comparação dos desempenhos de $SMER_I^2$ e $SMER_{I+C}^2$ contra os desempenhos de $SMER_I^1$ e $SMER_{I+C}^1$, utilizando os resultados obtidos no experimento 2 do cenário 1.

Métricas	$SMER_I^2$	$SMER_{I+C}^2$
TVS	<6,15%	<6,39%
TME	>17,93%	>5,03%
TMV	>8,02%	>3,97%
VM	<3,99%	<5,18%

Experimento 3

A seguir, a Tabela 7.63 apresenta os resultados dos experimento 3 do cenário 2 e, em seguida, a Tabela 7.64 apresenta a análise dos mesmos.

Tabela 7.63: Resultados obtidos com $SMER_I^2$ e $SMER_{I+C}^2$ no experimento 3 do cenário 2.

Métricas	Cenário 1		Cenário 2	
	$SMER_I^1$	$SMER_{I+C}^1$	$SMER_I^2$	$SMER_{I+C}^2$
TVS (veic./h)	5557	5805	5065	5375
TME (s)	25,17 ±1,03	20,8 ±1,07	30,7 ±1,43	27,63 ±1,7
TMV (s)	509,86 ±40,5	500,17 ±39,85	561,79 ±42,46	536,4 ±39,85
VM (Km/h)	12,91 ±1,3	12,95 ±1,63	10,52 ±1,3	12,5 ±1,63

Tabela 7.64: Comparação dos desempenhos de $SMER_I^2$ e $SMER_{I+C}^2$ contra os desempenhos de $SMER_I^1$ e $SMER_{I+C}^1$, utilizando os resultados obtidos no experimento 3 do cenário 1.

Métricas	$SMER_I^2$	$SMER_{I+C}^2$
TVS	<8,85%	<8,0%
TME	>21,97%	>32,83%
TMV	>10,18%	>7,24%
VM	<18,51%	<3,47%

7.6 Avaliando a Estratégia de Planejamento e Orientação de Rotas

Nesta seção, é apresentada a avaliação experimental acerca do sistema multiagente de planejamento e orientação de rotas. Os detalhes acerca das definições dos cenários de avaliação experimental e configurações dos experimentos podem ser encontrados em [42].

7.6.1 Análise dos Resultados do Cenário 1

Esta seção tem como objetivo apresentar os resultados obtidos por meio dos experimentos 1, 2 e 3 do cenário, assim como as análises comparativas dos mesmos.

Experimento 1

A seguir, a Tabela 7.65 apresenta os resultados dos experimento 1 do cenário 1 e, em seguida, a Tabela 7.66 apresenta a análise dos mesmos.

Tabela 7.65: Resultados obtidos com o ROOV, RCEMC e RCTMC no experimento 1 do cenário 1.

Métricas	SMER _I			SMER _{I+C}		
	ROOV	RCEMC	RCTMC	ROOV	RCEMC	RCTMC
TVS (veic./h)	4291	4200	4227	4400	4280	4400
TME (s)	5,6 ±0,57	12,61 ±0,49	14,89 ±0,46	5 ±0,39	12,21 ±0,47	14,25 ±0,44
TMV (s)	257 ±7,51	261,8 ±7,51	221,09 ±7,83	224 ±6,53	254 ±7,18	212 ±8,16
VM (Km/h)	22,29 ±0,42	21,18 ±0,39	24,22 ±0,65	26,65 ±1,45	22,97 ±0,39	25,93 ±0,65
CMC (ml)	416,49	417,21	339,00	432,28	481,3	351,74
CO(g)	12,75	13,84	11,06	13,57	15,86	11,48
CO₂(g)	1044,67	1094,46	850,23	1086,25	1262,83	869,61
HC(g)	0,367	0,3918	0,2994	0,372	0,481	0,309
NO_x(g)	2,08	2,201	1,729	2,21	2,44	1,46
PM_x(g)	0,1277	0,1351	0,106	0,139	0,143	0,109

Tabela 7.66: Comparação do desempenho do ROOV contra os desempenhos do RCEMC e RCTMC, utilizando os dados obtidos no experimento 1 do cenário 1.

Métricas	SMER _I		SMER _{I+C}	
	RCEMC	RCTMC	RCEMC	RCTMC
TVS (veic./h)	>2,16%	>1,51%	>2,80%	=
TME (s)	<55,59%	<62,39%	<59,04%	<64,91%
TMV (s)	<1,83%	>16,24%	<11,81%	>5,66%
VM (Km/h)	>5,24%	<7,96%	>16,02%	>2,77%
CMC (ml)	<0,017%	>22,85%	<10,18%	>22,89%
CO(g)	<7,87%	>15,28%	<14,43%	>18,20%
CO₂(g)	<4,54%	>22,86%	<13,98%	>24,91%
HC(g)	<6,13%	>22,74%	<22,66%	>20,38%
NO_x(g)	<5,49%	>20,30	<9,42%	>51,36%
PM_x(g)	<5,47%	>20,47%	<2,79%	>27,52%

Experimento 2

A seguir, a Tabela 7.67 apresenta os resultados dos experimento 2 do cenário 1 e, em seguida, a Tabela 7.68 apresenta a análise dos mesmos.

Tabela 7.67: Resultados obtidos com o ROOV, RCEMC e RCTMC no experimento 2 do cenário 1.

Métricas	SMER _I			SMER _{I+C}		
	ROOV	RCEMC	RCTMC	ROOV	RCEMC	RCTMC
TVS (veic./h)	6254	5735	5871	6600	6024	6155
TME (s)	5,68 ±0,47	24,59 ±1,85	14,96 ±0,59	5 ±0,39	23,85 ±1,79	14,78 ±0,59
TMV (s)	299,06 ±14,37	347,09 ±22,33	322,71 ±21,88	288,11 ±13,71	340,86 ±22,86	313,88 ±23,19
VM (Km/h)	20,06 ±0,65	14,53 ±1,05	16,40 ±0,84	21,15 ±0,65	16,01 ±1,05	17,21 ±0,88
CMC (ml)	575,19	646,67	590,69	624,76	669,21	637,35
CO(g)	16,87	22,53	18,23	18,52	23,44	18,7
CO₂(g)	1362,25	1613,81	1481,45	1479,54	1669,96	1507,97
HC(g)	0,527	0,616	0,553	0,570	0,640	0,561
NOx(g)	2,81	3,01	2,88	3,06	3,11	2,94
PMx(g)	0,164	0,154	0,164	0,179	0,160	0,169

Tabela 7.68: Comparação do desempenho do ROOV contra os desempenhos do RCEMC e RCTMC, utilizando os dados obtidos no experimento 2 do cenário 1.

Métricas	SMER _I		SMER _{I+C}	
	RCEMC	RCTMC	RCEMC	RCTMC
TVS (veic./h)	>9,04%	6,52%	>9,56%	>7,22%
TME (s)	<76,90%	<62,03%	<79,03%	<66,17%
TMV (s)	<13,83%	<7,32%	<15,47%	<8,21%
VM (Km/h)	>29,16%	>22,31%	>32,1%	>22,89%
CMC (ml)	<11,05%	<2,62%	<6,64%	<1,97%
CO(g)	<25,12%	<7,46%	<20,98%	<0,09%
CO₂(g)	<15,58%	<8,04%	<11,40%	<1,88%
HC(g)	<14,44%	<4,70%	<10,93%	>1,60%
NOx(g)	<6,64%	<2,43%	<1,60%	>4,08%
PMx(g)	>6,49%	=	>11,87%	>5,91%

Experimento 3

A seguir, a Tabela 7.69 apresenta os resultados dos experimento 3 do cenário 1 e, em seguida, a Tabela 7.70 apresenta a análise dos mesmos.

Tabela 7.69: Resultados obtidos com o ROOV, RCEMC e RCTMC no experimento 3 do cenário 1.

Métricas	SMER _I			SMER _{I+C}		
	ROOV	RCEMC	RCTMC	ROOV	RCEMC	RCTMC
TVS (veic./h)	6970	5557	4347	7057	5806	4506
TME (s)	9,22 ±0,87	25,17 ±1,03	38,78 ±5,63	9,00 ±0,89	20,08 ±1,07	37,87 ±5,5
TMV (s)	368,1 ±17,96	509,20 ±40,5	749,00 ±106,81	365,92 ±18,29	500,11 ±40,17	733,64 ±104,53
VM (Km/h)	16,95 ±1,3	12,91 ±1,3	13,43 ±1,63	16,98 ±1,3	12,95 ±1,3	13,98 ±1,63
CMC (ml)	917,55	599,35	513,06	917,83	622,00	537,99
CO(g)	27,02	16,66	14,99	27,25	25,18	15,42
CO₂(g)	2138,40	1503,41	1286,58	2139,02	1560,20	1409,96
HC(g)	0,777	0,631	0,544	0,779	0,657	0,564
NOx(g)	4,83	2,66	2,3	4,27	2,77	1,22
PMx(g)	0,257	0,130	0,114	0,259	0,136	0,119

Tabela 7.70: Comparação do desempenho do ROOV contra os desempenhos do RCEMC e RCTMC, utilizando os dados obtidos no experimento 3 do cenário 1.

Métricas	SMER _I		SMER _{I+C}	
	RCEMC	RCTMC	RCEMC	RCTMC
TVS (veic./h)	>25,42%	>60,34%	>21,54%	>56,61%
TME (s)	<63,36%	<23,77%	<55,17%	<76,23%
TMV (s)	<27,77%	<50,85%	<26,83%	<50,12%
VM (Km/h)	>31,29%	>26,20%	>31,11%	>21,45%
CMC (ml)	>53,09%	>78,83%	>47,56%	>70,60%
CO(g)	>62,18%	>80,25%	>8,22%	>76,71%
CO₂(g)	>42,23%	>66,20%	>37,09%	>51,70%
HC(g)	>23,13%	>42,83%	>18,56%	>38,12%
NOx(g)	>81,57%	>110%	>54,15%	>250%
PMx(g)	>97,69%	>125,43%	>90,44%	>117,64%

7.6.2 Análise dos Resultados do Cenário 2

Esta seção tem como objetivo apresentar os resultados obtidos com o ROOV no cenário 2. Além disso, ela visa a apresentar uma comparação dos desempenhos do ROOV no cenário 1 (ROOV¹) contra os desempenhos do ROOV no cenário 2 (ROOV²). As apresentações dos resultados e análises serão feitas de acordo com os experimentos 1, 2 e 3.

Experimento 1

A seguir, a Tabela 7.71 apresenta os resultados dos experimento 1 do cenário 2 e, em seguida, a Tabela 7.72 apresenta a análise dos mesmos.

Tabela 7.71: Resultados obtidos com ROOV nos experimentos 1 dos cenários 1 e 2.

Métricas	SMER _I		SMER _{I+C}	
	ROOV ¹	ROOV ²	ROOV ¹	ROOV ²
TVS (veic./h)	4291	4157	4400	4400
TME (s)	5,6 ±0,57	5,71 ±0,85	5,00 ±0,39	5,26 ±0,87
TMV (s)	257,00 ±7,51	263,98 ±7,51	224,00 ±6,53	233,03 ±7,18
VM (Km/h)	22,29 ±0,39	21,40 ±0,48	26,65 ±0,42	24,9 ±0,48
CMC (ml)	416,49	405,42	432,28	416,61
CO(g)	12,75	13,11	13,57	14,08
CO₂(g)	1044,67	1040,35	1086,25	1062,04
HC(g)	0,367	0,362	0,372	0,360
NO_x(g)	2,08	2,13	2,21	2,25
PM_x(g)	0,127	0,134	0,139	0,143

Tabela 7.72: Comparação dos desempenhos do ROOV² contra os do ROOV¹, utilizando os resultados obtidos no experimento 1 do cenário 2.

Métricas	ROOV ² _{SMER_I}	ROOV ² _{SMER_{I+C}}
TVS	<3,12%	=
TME	>1,96%	>5,20%
TMV	>2,71%	>4,03%
VM	<3,99%	<6,56%
CMC	<2,65%	<3,62%
CO	>2,82%	>3,75%
CO₂	<0,04%	<2,22%
HC	<1,36%	<3,22%
NO_x	>2,40%	>1,80%
PM_x	>5,51%	>0,01%

Experimento 2

A seguir, a Tabela 7.73 apresenta os resultados dos experimento 2 do cenário 2 e, em seguida, a Tabela 7.74 apresenta a análise dos mesmos.

Tabela 7.73: Resultados obtidos com ROOV nos experimentos 2 dos cenários 1 e 2.

Métricas	SMER _I		SMER _{I+C}	
	ROOV ¹	ROOV ²	ROOV ¹	ROOV ²
TVS (veic./h)	6254	6254	6600	6557
TME (s)	5,68 ±0,57	6,18 ±0,47	5 ±0,39	6,10 ±0,46
TMV (s)	299,06 ±14,37	300,52 ±9,47	288,11 ±13,71	292,30 ±9,14
VM (Km/h)	20,06 ±0,65	19,93 ±0,65	21,15 ±0,65	20,92 ±0,65
CMC (ml)	575,19	660,43	624,76	612,00
CO(g)	18,87	18,70	18,52	19,18
CO₂(g)	1362,25	1446,64	1479,54	1472,53
HC(g)	0,527	0,535	0,570	0,542
NO_x(g)	2,81	3,10	3,06	3,16
PM_x(g)	0,164	0,189	0,179	0,193

Tabela 7.74: Comparação dos desempenhos do ROOV² contra os do ROOV¹, utilizando os resultados obtidos no experimento 2 do cenário 2.

Métricas	ROOV ² _{SMER_I}	ROOV ² _{SMER_{I+C}}
TVS	=	<0,06%
TME	>8,80%	>22,00%
TMV	>0,04%	>1,45%
VM	<0,06%	>1,08%
CMC	>14,81%	<3,64%
CO	<0,09%	<3,64%
CO₂	>6,19%	<0,04%
HC	>1,51%	<4,91%
NO_x	>10,32%	>3,26%
PM_x	>15,24%	>7,82%

Experimento 3

A seguir, a Tabela 7.75 apresenta os resultados dos experimento 3 do cenário 2 e, em seguida, a Tabela ?? apresenta a análise dos mesmos.

Tabela 7.75: Resultados obtidos com ROOV nos experimentos 3 dos cenários 1 e 2.

Métricas	SMER _I		SMER _{I+C}	
	ROOV ¹	ROOV ²	ROOV ¹	ROOV ²
TVS (veic./h)	6970	6603	7057	6899
TME (s)	9,22 ±0,87	10,71 ±0,86	9 ±0,89	10,33 ±0,89
TMV (s)	368,1 ±18,29	379,25 ±18,61	365,92 ±17,96	376,16 ±18,29
VM (Km/h)	16,95 ±1,3	14,44 ±1,3	16,98 ±1,3	14,49 ±1,3
CMC (ml)	917,55	948,95	917,83	914,381
CO(g)	27,02	32,99	27,25	46,89
CO ₂ (g)	2138,4	2333,79	2139,02	2421,95
HC(g)	0,777	0,859	0,779	0,895
NO _x (g)	4,83	4,82	4,27	5,02
PM _x (g)	0,257	0,307	0,259	0,322

Tabela 7.76: Comparação dos desempenhos do ROOV² contra os do ROOV¹, utilizando os resultados obtidos no experimento 3 do cenário 2.

Métricas	ROOV ² _{SMER_I}	ROOV ² _{SMER_{I+C}}
TVS	<5,26%	<2,22%
TME	>16,16%	>14,77%
TMV	>3,02%	>2,79%
VM	<14,80%	<14,66%
CMC	>3,42%	<0,03%
CO	>22,09%	>72,07%
CO ₂	>9,13%	>13,22%
HC	>10,55%	>14,89%
NO _x	<0,02%	>17,56%
PM _x	>19,45%	>24,32%

7.7 Discussão

Nesta seção, são apresentadas as discussões acerca da RAdNet-VE e HRAdNet-VE e, as discussões em torno do sistema multiagente de controle de tráfego e do sistema multiagente de planejamento e orientação de rotas. Essas discussões são apresentadas nas próximas seções.

7.7.1 RAdNet-VE e HRAdNet-VE

No que diz respeito à RAdNet-VE e à HRAdNet-VE, percebe-se que o baixo custo de mensagens trafegadas foi consequência do mecanismo de encaminhamento de men-

sagens. Tal mecanismo fez uso dos campos posição relativa da origem da mensagem de rede, direção de propagação de mensagens e identificador de via para filtrar mensagens. Esse baixo custo de mensagens trafegadas também resultou da estratégia adotada no mecanismo de registro de interesses. Tal mecanismo registrou os interesses definidos pelas aplicações e limitou o número de saltos que as mensagens puderam alcançar, à medida que eram encaminhadas pelos nós. Com isso, os nós transmitiram mensagens dentro de um escopo bem definido, resultando na redução do custo de mensagens trafegadas. Devido ao baixo custo de mensagens trafegadas, as mensagens não congestionaram os canais de comunicação dos nós. Consequentemente, isso levou a uma baixa latência de comunicação entre os nós da rede. Com o baixo custo de mensagens trafegadas e uma baixa latência de comunicação entre os nós, foi possível alcançar altas taxas de entrega de dados. Essas mesmas características puderam também ser observadas nos resultados da HRAdNet-VE.

Embora o protocolo de comunicação da HRAdNet-VE tenha fornecido altas taxas de entrega de dados por meio de interfaces de acesso à comunicação sem fio baseadas nos padrões IEEE 802.11n e LTE, ele não forneceu altas taxas de entrega de dados com interfaces baseadas no padrão IEEE 802.11p, quando as aplicações operaram em modo reativo. As baixas taxas de entrega de dados é uma consequência do alto número de mensagens produzidas pelo modo de comunicação do tipo requisição-resposta e as altas densidades de nós dentro dos alcances de comunicação das interfaces baseadas no padrão IEEE 802.11p. Embora os nós tenham trafegado em diferentes vias, suas interfaces de acesso à comunicação sem fio compartilharam o mesmo meio. Por isso, o desempenho do protocolo de comunicação foi fortemente afetado. Por esta razão, neste trabalho, argumenta-se que interfaces de acesso a comunicação sem fio baseadas no padrão IEEE 802.11p não devem ser usadas para fornecer comunicações baseadas em comunicações do tipo requisição-resposta em ambientes com altas densidades de nós.

Além disso, também é importante fazer uma discussão dos protocolos de comunicação da RAdNet-VE e HRAdNet-VE em torno dos requisitos de comunicação das categorias de aplicações para VANETs [38]. Embora ZHENG *et al.* [24] tenha definidos os requisitos de comunicação de aplicações de serviços de sistemas inteligentes de transporte, observa-se que estes estão inclusos nas definições de requisitos de comunicação de aplicações para VANETs, como pôde ser observado em WILLKE *et al.* [38].

Quando aplicações precisam de comunicações com baixa latência, o protocolo de comunicação deve permitir que os nós se comuniquem com o menor atraso possível [38]. De acordo com os resultados apresentados nas seções anteriores, os protocolos de comunicação da RAdNet-VE e da HRAdNet-VE forneceram comunicações com baixo atraso. Tanto a RAdNet-VE quanto a HRAdNet-VE não sofreram com

o dinamismo topológico inerente às redes veiculares, pois o mecanismo de comunicação centrada em interesse não leva em conta a topologia da rede. Além disso, os protocolos de comunicação da RAdNet-VE e da HRAdNet-VE não usam mensagens de controle para manter ou atualizar dados de roteamento de mensagens. Por esse motivo, um número menor de mensagens trafegadas foi produzido durante as comunicações entre os nós.

Segundo WILLKE *et al.* [38], aplicações precisam de um protocolo que entregue mensagens a um grupo de nós. Tanto o protocolo da RAdNet-VE quanto o da HRAdNet-VE, satisfazem parte desse requisito por meio do mecanismo de comunicação centrada em interesses herdado do protocolo de comunicação da RAdNet [40]. Porém, o protocolo deve assegurar uma alta probabilidade de entrega de mensagens [38]. Para tanto, os protocolos de comunicação da RAdNet-VE e da HRAdNet-VE usam dois campos presentes em seus cabeçalhos de mensagens para encaminhar mensagens, usando os nós mais distantes da origem das mensagens e direções para propagações de mensagens, que são definidas pelas aplicações. Os benefícios disso foram a redução do custo de mensagens trafegadas e redução do tempo de propagação de mensagens em longas distâncias. Outro campo importante no processo de encaminhamento de mensagens é o identificador de via. Por meio desse campo, foi possível limitar o escopo de comunicação nas vias.

Segundo WILLKE *et al.* [38], aplicações para controlar movimentos individuais (por exemplo, controle adaptativo e cooperativo de cruzeiro) operam em um escopo bem definido, que pode ser uma vizinhança de veículos ou uma pequena região dentro de uma rede. Portanto, o protocolo de comunicação deve assegurar a entrega seletiva de mensagens, que pode ser baseada em trajetória, proximidade de veículo ou identificação do veículo [38]. Além disso, aplicações de serviços de sistemas inteligentes de transporte podem necessitar de escopos bem definidos de comunicação, pois os nós de infraestrutura precisam se comunicar uns com os outros para capturar, processar e distribuir informações de segurança e dados relativos às condições de tráfego. Para tanto, esses nós precisam estabelecer comunicações de um salto. Com base no registro do número máximo de saltos juntamente com os interesses, foi possível estabelecer um escopo de comunicação limitado na RAdNet-VE e na HRAdNet-VE. Os benefícios destas estratégias puderam ser observados nos experimentos do segundo cenário de avaliação da HRAdNet-VE, visto que o custo de mensagens aumentou muito pouco, quando comparado com os experimentos do primeiro cenário.

No que tange ao baixo custo de mensagens para comunicações de estrutura de grupos, aplicações para controlar movimentos de grupo precisam de um protocolo que as permitam manter e atualizar estruturas persistentes de grupos [38]. Além disso, aplicações de serviços de sistemas inteligentes de transporte para controle de tráfego em áreas compartilhadas entre duas ou mais vias baseiam-se em comu-

nicações de estrutura de grupos para capturar dados de condições de tráfego. Nesse caso, cada via forma uma estrutura persistente de grupo. Tanto a RAdNet-VE quanto a HRAdNet-VE são redes centradas em interesses e, por isso, elas não precisam de mecanismos centralizados para gerenciar grupos. Por meio do mecanismo de comunicação centrada em interesses, essas redes implementam comunicações de estrutura de grupos de maneira distribuída e com um baixo custo de mensagens.

7.7.2 Estratégias de Controle de Tráfego

O sistema multiagente de controle de tráfego teve como ponto de partida o trabalho desenvolvido por PAIVA [1], que forneceu um estudo inicial acerca do uso do algoritmo de escalonamento distribuído SMER para controlar sinalizações semafóricas em interseções isoladas ou sistemas coordenados de sinalizações semafóricas. Esse trabalho, por sua vez, foi estendido por esta tese, introduzindo elementos relativos à comunicação veicular, a fim de substituir a leitura das flutuações de tráfego, que antes eram feitas por meio de sensores de pressão, instalados nas entradas das vias controladas pelas sinalizações semafóricas, pela troca de mensagens de dados entre veículos conectados e sinalizações semafóricas inteligentes.

Com base nesta extensão, é possível completar uma lacuna encontrada no trabalho de PAIVA [1], que é a contagem de veículos realizada somente, quando os veículos entram em uma via cujo fluxo é controlado por uma sinalização semafórica inteligente. Isso poderia comprometer o ajuste dos intervalos de indicações de luzes verdes nas sinalizações semafóricas, uma vez que alguns veículos poderiam ficar retidos na via, quando os mesmos não conseguissem atravessar a interseção durante o intervalo de indicação de luz verde dedicado para a via em que estão localizados. Nesta tese, essa deficiência foi corrigida por meio de trocas de mensagens dados, que permitiram as sinalizações semafóricas constantemente requisitarem a presença de veículos nas vias de entradas de interseções, em que elas foram instaladas.

Outra lacuna relativa ao trabalho de PAIVA [1], que foi preenchida por esta tese, é a definição de primitivas acerca do controle de interseções isoladas e do controle de sistemas coordenados de sinalizações semafóricas. Nesta tese, tais primitivas foram definidas na forma de interesses, que foram utilizados nas interações e trocas dados entre os agentes Sinalização Semafóricas. Juntamente com as primitivas de controle, também foram definidos os algoritmos para tratamento das mesmas.

De acordo com os resultados obtidos, por meio dos experimentos com a HRAdNet-VE, foi possível constatar, durante a avaliação experimental do sistema multiagente de controle de tráfego, que as estratégias relativas ao controle de interseções isoladas e ao controle de sistemas coordenados de sinalizações semafóricas funcionaram corretamente em um ambiente de rede veicular heterogênea. Até a con-

clusão dos experimentos, existiu uma preocupação quanto às operações do sistema multiagente de controle de tráfego sobre a HRAdNet, pois os agentes Sinalização Semafórica precisariam se adaptar rapidamente às flutuações de fluxos de tráfego. Para tanto, a periodicidade de obtenções de médias de quantidades de veículos nas vias de entrada das interseções deveria ser pequena. Isso poderia comprometer as operações do sistema multiagente de controle de tráfego. Embora tenha acontecido uma troca intensiva de mensagens de interação entre os agentes, o sistema multiagente de controle de tráfego operou sem apresentar qualquer problema sobre a HRAdNet-VE.

Quanto à operação do sistema multiagente de controle de tráfego, como pôde ser observado anteriormente, esta pode se dar tanto em condições favoráveis ou desfavoráveis, quando se trata do funcionamento das sinalizações semafóricas. Esta tese não somente estendeu e aperfeiçoou o trabalho de PAIVA [1], mas também propôs estratégias para o controle de interseções isoladas e o controle de sistemas coordenados de sinalizações semafóricas, utilizando a presença de veículos conectados nas vias cujas sinalizações semafóricas apresentaram ausência de funcionamento. Tal estratégia dependeu de um centro de controle de tráfego hipotético, que é capaz de manter um sistema supervisor, que, por sua vez, é alimentado com dados capturados pelo agente Centro de Controle de Tráfego. Embora um centro de controle de tráfego possa oferecer alta disponibilidade para recuperar dados de controle de interseções isoladas e interseções participantes de sistemas coordenados de sinalizações semafóricas, a ausência desse compromete a estratégia, pois veículos conectados e sinalizações semafóricas dependem do encaminhamento de mensagens da rede celular para que a estratégia funcione corretamente.

Analisando os resultados obtidos por meio dos experimentos dos cenários definidos para avaliação, percebeu-se que o sistema multiagente de controle de tráfego cumpre o seu objetivo, pois ele foi capaz de melhorar a fluidez do tráfego, maximizando o número de veículos que chegam aos destinos de viagem e a velocidade média dos veículos. Além disso, o sistema multiagente de controle de tráfego foi capaz de minimizar o tempo médio de espera e tempo médio de viagem. Mesmo em um cenário utilizando interseções com sinalizações semafóricas com ausência de funcionamento, o sistema multiagente de controle de tráfego mostrou-se viável, uma vez que, ao se comparar os resultados obtidos em condições como esta, ele apresentou resultados numéricos próximos aos que foram obtidos nos experimentos do cenário em que todas as sinalizações semafóricas funcionam. Com isso, pode-se afirmar que as estratégias de controle, utilizando o arcabouço teórico do algoritmo distribuído SMER são promissoras.

Embora o sistema multiagente de controle de tráfego tenha se saído melhor, quando comparado a um sistema de controle de tráfego baseado em sinalizações semafóricas pré-temporizadas, os resultados poderiam ter sido melhores, caso o sis-

tema fosse imune ao desbalanceamento severo das densidades de veículos em algumas vias. Isso confirmou uma hipótese levantada na introdução desse trabalho. O desempenho de um sistema avançado de gerenciamento de tráfego cai, quando um desbalanceamento severo nas densidades das vias acontece.

7.7.3 Estratégia de Planejamento e Orientação de Rotas

O sistema multiagente de planejamento e orientação de rotas teve como base o trabalho desenvolvido por FARIA [41], que forneceu um estudo inicial sobre uma abordagem para planejamento e orientação de rotas. De acordo com a literatura de sistemas multiagentes, tal abordagem pode ser entendida como um sistema multiagente baseado em alocação de recursos. Portanto, a abordagem se baseia no compartilhamento dos planos de temporização das sinalizações semaforicas pertencentes a um sistema de controle de tráfego. No entanto, FARIA [41] não descreve como tal compartilhamento acontece, pois o mesmo parte do pressuposto de que exista uma agenda global de intervalos de luz verde, que é conhecida por todas as sinalizações semaforicas de um sistema avançado de controle de tráfego.

Partindo de um ambiente suportado por uma rede veicular heterogênea, esta tese estendeu o trabalho de FARIA [41], adicionando um mecanismo de compartilhamento de dados de controle das interseções, que permitiu a cada agente Sinalização Semaforica gerar localmente entradas em sua visão da agenda global de intervalos de indicações de luzes verdes. Os dados de controle das interseções foram compostos dos valores de parâmetros das configurações de desempenho das sinalizações semaforicas e os multigrafos de controle utilizados pelo algoritmo de escalonamento distribuído SMER. Dessa forma, cada agente pôde ter sua visão particular sobre a agenda global produzida pelo sistema avançado de gerenciamento de tráfego. Nesta tese, o sistema gerenciamento de controle de tráfego é o sistema multiagente de controle de tráfego. O maior benefício alcançado por esta técnica é a dispensa do uso de uma infraestrutura computacional de alto custo.

Com base nas disponibilidades das entradas das agendas de intervalos de luz verde, foi possível construir um algoritmo de cálculo de rotas ótimas, que é executado pelos agentes Sinalização Semaforica ou pelos agentes Veículo, quando esses estão controlando o tráfego em interseções. Esse ponto põe uma luz sobre o trabalho de FARIA [41], pois havia uma indefinição acerca de quem era o responsável em calcular as rotas. Além disso, nesta tese, com as disponibilidades citadas acima, o mapa viário pôde ser visto como um grande sistema flexível de manufatura do tipo *job-shop*. Dessa forma, o algoritmo de cálculo de rotas teve como base heurísticas para geração de regras de despacho. Esse algoritmo tirou proveito dos espaços alocados nas vias para os veículos, à medida que esses requisitam cálculos de rotas

aos responsáveis pelos controles das interseções.

Nesta tese, sempre que um agente Veículo requisitou um replanejamento de rota, quando o veículo que o embute deixava uma interseção, o sistema de planejamento e orientação de rotas sofreu alterações, no que diz respeito a manutenção de rotas nas entradas das agendas de interlavos de luzes verdes. Com base nos experimentos com a HRAdNet-VE, é possível afirmar que as trocas de mensagens não afetaram o desempenho da rede veicular heterogênea.

Outro ponto importante a ser discutido é o impacto das mudanças das agendas de intervalos de luzes verdes, à medida que os agentes responsáveis pelo controle das interseções mudam as configurações de controle das interseções em função das flutuações dos fluxos do tráfego de uma via. Tais mudanças não afetaram o desempenho da HRAdNet-VE, apesar do alto custo de comunicação gerado por elas.

Nesta tese, foi introduzido o conceito de elemento urbano. Na prática, elementos urbanos podem enriquecer o processo de seleção de rotas para os veículos, pois eles foram capazes de usar a HRAdNet-VE para publicar dados acerca de suas localizações. Com base nesses dados, as camadas de rede dos veículos conectados, sinalizações semafóricas inteligentes e centro de controle de tráfego foram configuradas. Nesta tese, não foi considerado o custo de recuperação de interesses de baixa popularidade na rede centrada em interesses. Como mencionado anteriormente, os interesses com maior popularidade são mantidos em memória. Os interesses com baixa popularidade devem ficar armazenados em disco. Por isso, estudos futuros devem investigar o impacto do custo de recuperação de interesses de baixa popularidade durante a recepção e o encaminhamento de mensagens de rede.

Analisando os resultados dos experimentos com o sistema de planejamento e orientação de rotas, é possível afirmar que o mesmo atingiu seus objetivos. Neste sentido, ele foi capaz de maximizar o número de veículos que chegam ao destino planejado, assim como a velocidade média dos veículos. Além destas otimizações, o sistema também foi capaz de minimizar o tempo médio de espera, tempo médio de viagem, consumo de combustível e emissões (CO, CO₂, HC, NO_x e PM_x). Esses resultados só foram alcançados, pois o algoritmo de planejamento e roteamento orientado a ondas verde foi capaz de distribuir os volumes de tráfego ao longo de uma rede viária. Tal distribuição de volume de tráfego pôde ser observada nos três experimentos definidos no cenário 1. As figuras seguintes apresentarão as distribuições de volume de tráfego geradas pelo roteamento baseado em caminho espacialmente mais curto, roteamento baseado em caminho temporalmente mais curto e roteamento orientado a ondas verdes. As distribuições de volume de tráfego geradas durante o experimento 1 são apresentadas nesta ordem pelas Figuras 7.1, 7.2 e 7.3. As distribuições de volume de tráfego geradas durante o experimento 2 são apresentadas nesta ordem pelas Figuras 7.4, 7.5 e 7.6. As distribuições de volume de tráfego

geradas durante o experimento 3 são apresentadas nesta ordem pelas Figuras 7.7, 7.8 e 7.9.

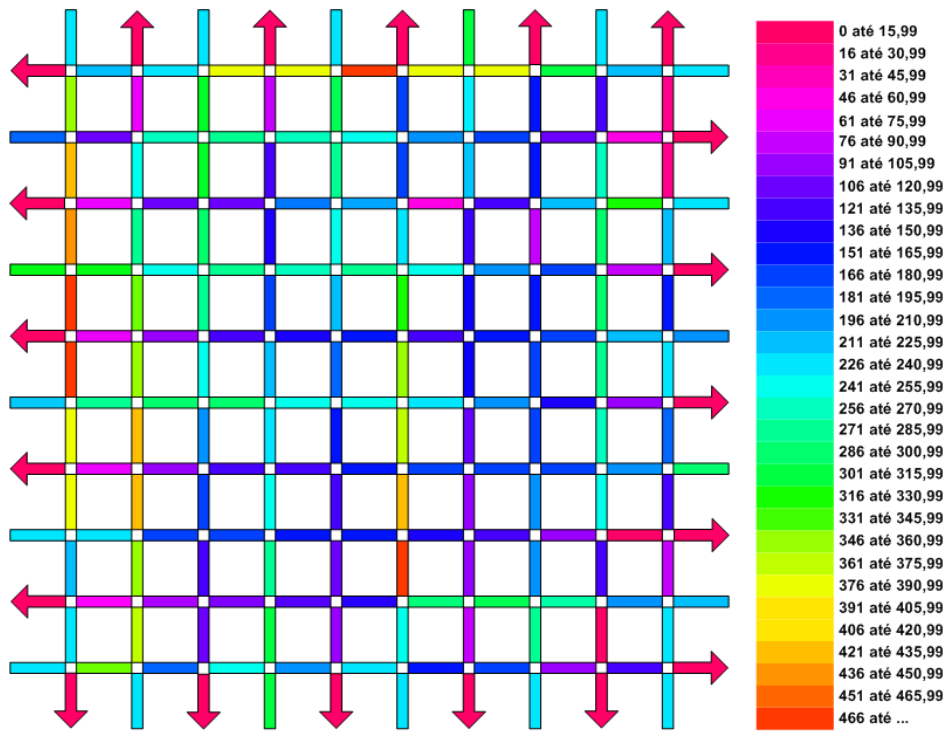


Figura 7.1: Distribuição do volume de tráfego realizada pelo algoritmo de roteamento baseado no caminho espacialmente mais curto durante experimento 1.

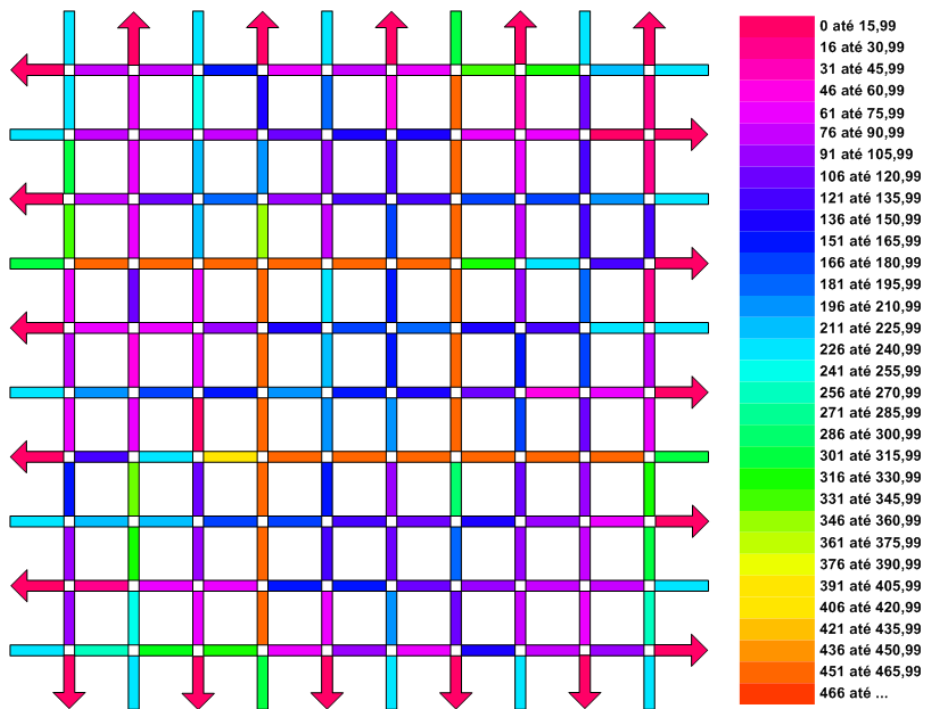


Figura 7.2: Distribuição do volume de tráfego realizada pelo algoritmo de roteamento baseado no caminho temporalmente mais curto durante experimento 1.

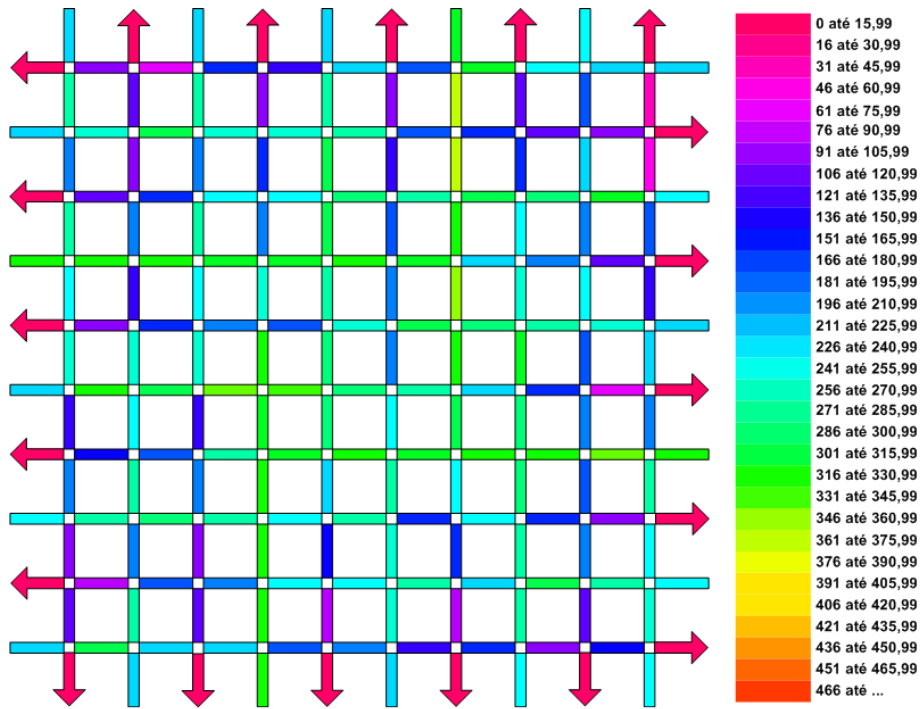


Figura 7.3: Distribuição do volume de tráfego realizada pelo algoritmo de roteamento orientado à ondas verdes mais curto durante experimento 1.

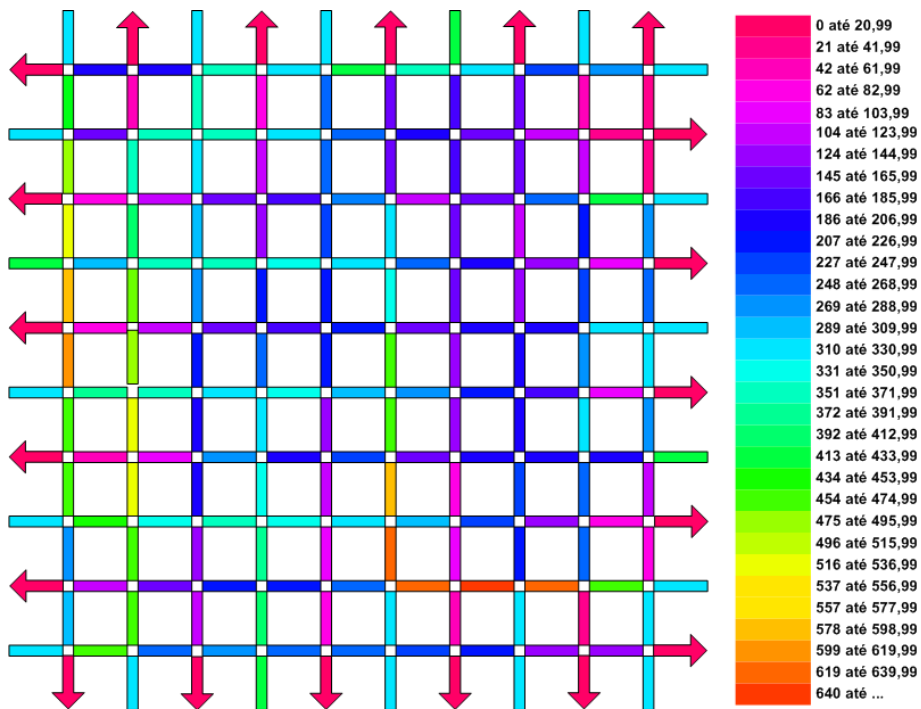


Figura 7.4: Distribuição do volume de tráfego realizada pelo algoritmo de roteamento baseado no caminho espacialmente mais curto durante experimento 2.

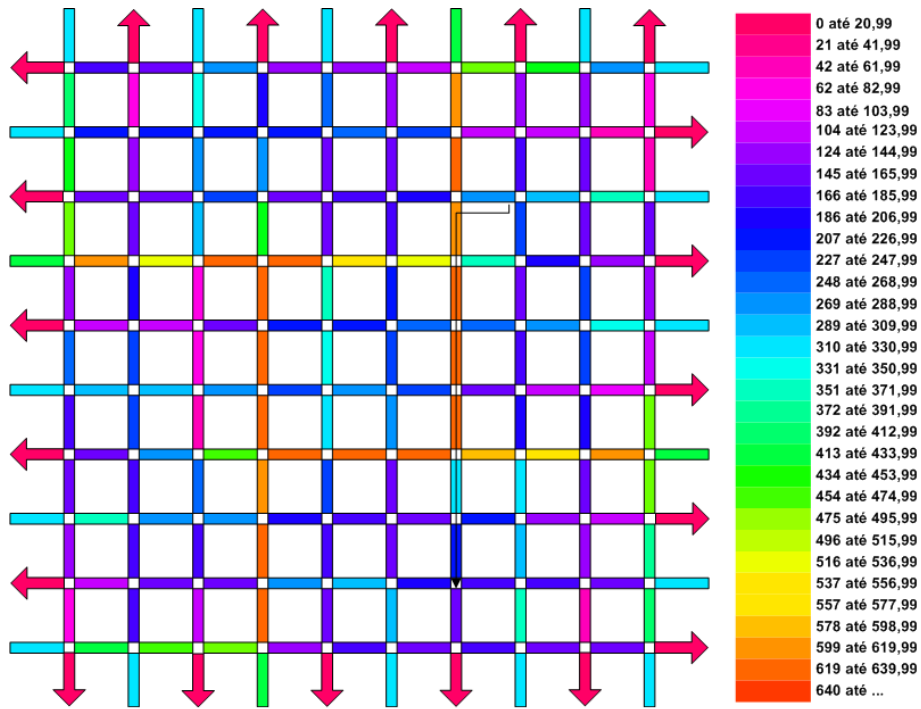


Figura 7.5: Distribuição do volume de tráfego realizada pelo algoritmo de roteamento baseado no caminho temporalmente mais curto durante experimento 2.

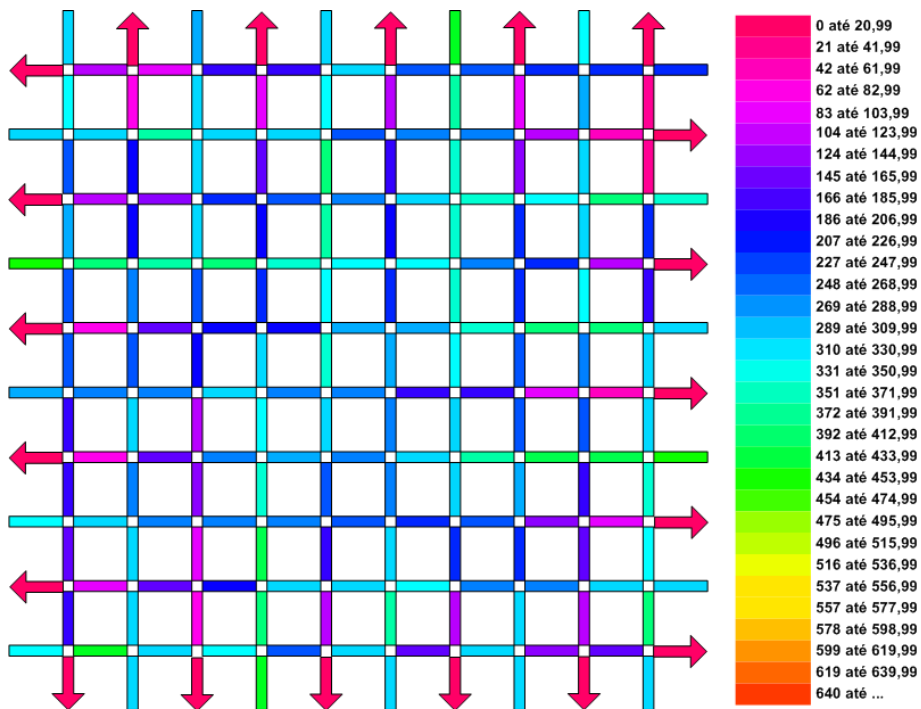


Figura 7.6: Distribuição do volume de tráfego realizada pelo algoritmo de roteamento orientado à ondas verdes mais curto durante experimento 2.

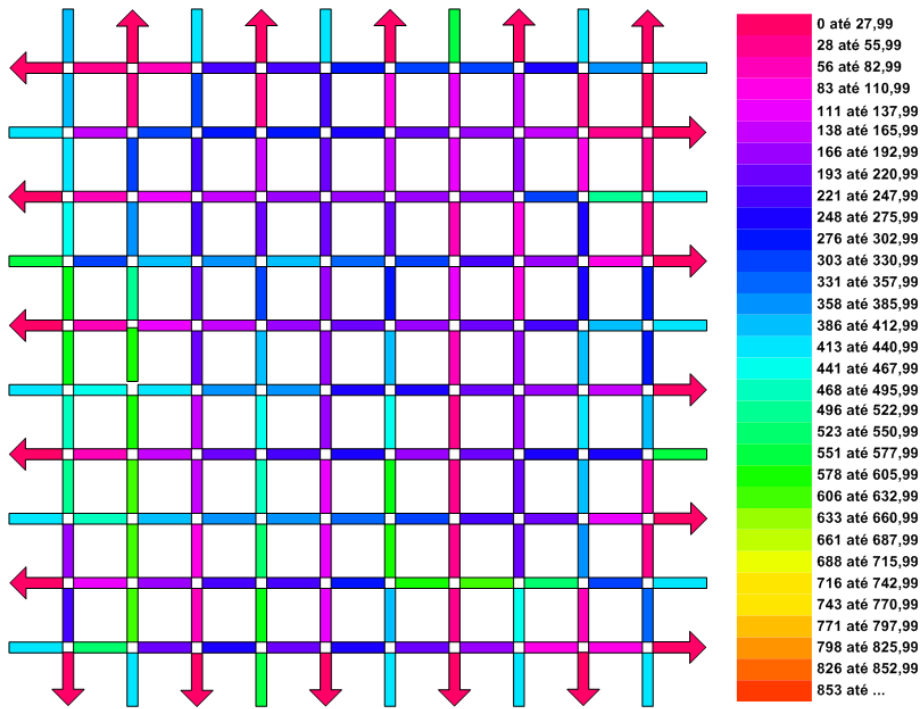


Figura 7.7: Distribuição do volume de tráfego realizada pelo algoritmo de roteamento baseado no caminho espacialmente mais curto durante experimento 3.

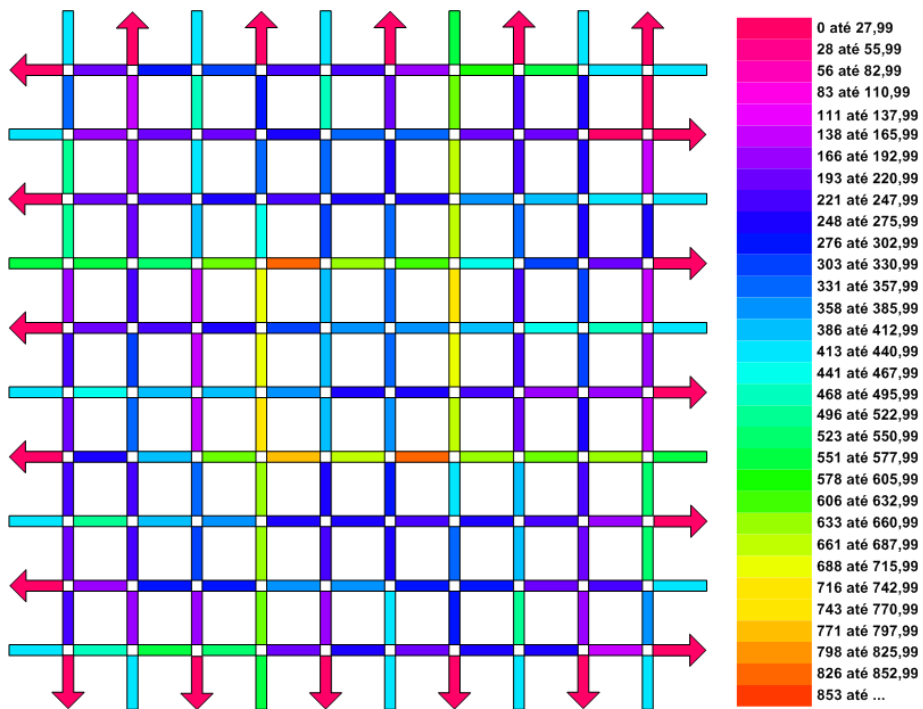


Figura 7.8: Distribuição do volume de tráfego realizada pelo algoritmo de roteamento baseado no caminho temporalmente mais curto durante experimento 3.

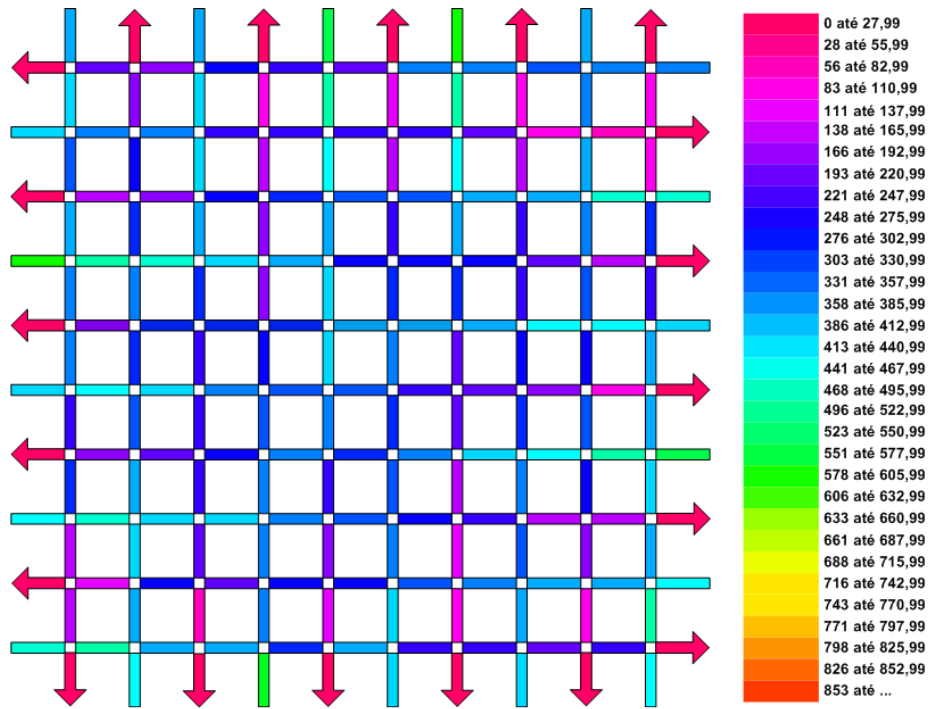


Figura 7.9: Distribuição do volume de tráfego realizada pelo algoritmo de roteamento orientado à ondas verdes mais curto durante experimento 3.

Como pode ser observado nas figuras apresentadas anteriormente, o algoritmo de roteamento orientado a ondas verdes foi capaz de distribuir de maneira uniforme o volume de tráfego sobre o mapa viário utilizado nos experimentos, enquanto os demais algoritmos de roteamento acumularam veículos em determinadas áreas do mapa. Como pôde ser observado nas Figuras 7.3, 7.6 e 7.9, as cores com maior predominância nos mapas são aquelas mais próximas do centro das escalas de cores. É importante perceber que o algoritmo de roteamento orientado a ondas verdes é capaz de montar rotas que minimizam o tempo de espera do veículos, quando eles chegam a uma via onde a sinalização semafórica indica luz vermelha. No entanto, os resultados numéricos apresentados anteriormente também foram obtidos com uso do mecanismo de controle de velocidade orientado à ondas verdes proposto no trabalho de FARIA [41].

Nesta tese, o mecanismo de controle de velocidade orientado a ondas verdes foi viabilizado em conjunto com um controle adaptativo e cooperativo de cruzeiro. Embora FARIA [41] tenha proposto o mecanismo em questão, ele não foi testado em ambiente de rede veicular. Portanto, esta tese mostrou que a proposta de FARIA [41] funcionou adequadamente, quando esta foi executada sobre uma rede veicular centrada em interesses.

Capítulo 8

Conclusões e Trabalhos Futuros

Este capítulo apresenta as conclusões, submissões, publicações, e trabalhos futuros relacionados à pesquisa desenvolvida nesta tese.

8.1 Conclusões

Esta tese apresentou um controle distribuído de tráfego baseado em veículos conectados. Devido aos requisitos de comunicação deste tipo de aplicação para sistemas inteligentes de transporte, tornou-se imperativo o desenvolvimento de uma rede veicular cujo protocolo de comunicação fosse capaz de fornecer baixo custo de mensagens trafegadas, comunicações de baixa latência, altas taxas de entrega, escopo de comunicação bem definido e escalabilidade.

Nesse sentido, este estudo propôs, inicialmente, uma rede *ad hoc* veicular centrada em interesses chamada RAdNet-VE, que é uma extensão da rede *ad hoc* móvel centrada em interesses para ambientes veiculares. Devido à necessidade de realizar comunicações com diversos tipos de tecnologias de acesso à comunicação sem fio, o projeto da RAdNet-VE foi estendido, objetivando a criação de uma rede veicular heterogênea centrada em interesses, que foi chamada de HRAdNet-VE. Tanto a RAdNet-VE quanto a HRAdNet-VE foram capazes de satisfazer os requisitos citados acima.

Após a conclusão do projeto da HRAdNet-VE, deu-se início ao projeto de um sistema multiagente de controle de tráfego. As estratégias de controle distribuído propostas neste sistema, tiveram como base os algoritmos de escalonamento distribuído propostos por PAIVA [1]. Os resultados obtidos por meio dos experimentos mostraram que tal sistema é capaz de melhorar a fluidez do tráfego em uma área controlada por sinalizações semafóricas inteligentes. No entanto, tal sistema de controle de tráfego, assim como os existentes na literatura, não foi imune ao desbalanceamento na distribuição dos fluxos de tráfego.

Para tratar esse problema, este estudo propôs um sistema multiagente de planejamento e orientação de rotas. Ele foi construído sobre o sistema multiagente de controle de tráfego, a fim de tirar proveito das disponibilidades de intervalos de indicações de luzes verdes das sinalizações semaforicas e, com isso, criar rotas ótimas para o roteamento de veículos. Para lidar com o problema de roteamento de veículos, esta tese se apropriou das teorias e heurísticas de despacho de sistemas flexíveis de manufatura do tipo job-shop, assim como das propostas apresentadas por FARIA [41]. Com isso, foi possível construir um algoritmo de roteamento de veículos orientado a ondas verdes, que tira proveito das disponibilidades de intervalos de luz verde e espaços nas vias de uma rede viária. Por meio do sistema multiagente de planejamento e orientação de rotas, e um mecanismo de controle de velocidade orientado a ondas verdes, foi possível melhorar um pouco mais a fluidez do tráfego de veículos.

8.2 Publicações e Submissões

Durante a condução deste trabalho de doutorado, obteve-se uma publicação, que é a seguinte: *Interest-Centric Vehicular Ad Hoc Network*, aceito para publicação na *12th IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications*, realizada em outubro de 2016. Este artigo apresenta a proposta da RAdNet-VE. Além disso, também foi submetido um artigo intitulado *Heterogeneous Interest-Centric Vehicular Network* para o periódico *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. Segundo a última avaliação do Qualis, a conferência e o periódico foram avaliados como A2 e A1, respectivamente.

8.3 Trabalhos Futuros

As propostas de trabalhos futuros relacionados a este estudo foram agrupadas de acordo com as propostas apresentadas nos Capítulos 3, 5 e 6. Com base nisso, seguem os trabalhos futuros:

- **Redes Veiculares Centradas em Interesses:**
 - Pesquisar e desenvolver novos cenários relacionados à área de sistemas inteligentes de transporte, de modo que, com base nestes, sejam criados novos experimentos para realização de testes com a RAdNet-VE e a HRAdNet-VE;
 - Projeto e desenvolvimento de uma arquitetura de software cujo objetivo é servir como um *framework* para desenvolvimento de aplicações de serviços de sistemas inteligentes de transporte;

- Projeto e desenvolvimento de um *framework* para desenvolvimento de cenários de avaliação de sistemas inteligentes de transporte sobre as redes veiculares centradas em interesses, estendendo os *frameworks* disponíveis para o Omnet++. Neste trabalho futuro, também deve ser considerada uma maneira de trabalhar com mapas do Open Street Map;
 - Investigar a possibilidade de utilização de comunicações centradas em interesses, utilizando comunicação D2D em redes celulares LTE;
 - Avaliar o impacto de interesses de baixa popularidade na latência de comunicação entre nós, uma vez que tais interesses não ficam constantemente disponíveis em memória. Para tanto, devem ser utilizados dispositivos que possam ser embarcados em veículos e sinalizações semafóricas;
 - Pesquisar e desenvolver estudos relacionados à segurança das redes centradas em interesses, utilizando nomes auto-certificáveis;
- **Controle Inteligente de Tráfego Utilizando Sinalizações Semafóricas e Veículos Conectados:**
 - Melhorar o mecanismo de leitura de fluxos de tráfego, de modo que ele possa utilizar dados microscópicos de veículos, tais como a classe dos mesmos. Com isso, o controle de tráfego passará a trabalhar com quantidades equivalentes de veículos;
 - Melhorar o mecanismo de cálculo de demandas, de modo que ele possa considerar diferentes tamanhos vias;
 - Desenvolver novos cenários para avaliações experimentais, utilizando mapas viários cujas vias apresentam mais de uma faixa;
 - Desenvolver estudos, utilizando o sistema multiagente de controle de tráfego, em mapas viários do Open Street Map. Esses estudos devem utilizar dados realísticos de tráfego, de modo que seja possível avaliar o comportamento das estratégias de controle de tráfego em condições reais de tráfego;
 - Estender o algoritmo SMER de controle de interseções isoladas, de modo que ele possa levar em consideração o fluxo de pedestres em interseções controladas por sinalizações semafóricas;
 - Desenvolver cenários para avaliações experimentais, utilizando o controle de interseções por meio de veículos conectados, sem que exista um centro de controle de tráfego para manter dados de controle acerca de interseções. Neste cenário, os agentes Veículo devem ser capazes de negociar as passagens de seus veículos conectados pelas interseções, enquanto

outros veículos esperam as liberações das mesmas, para, então, atravessá-las;

- **Planejamento e Orientação Inteligente de Rotas Baseados em Interesses de Motoristas:**

- Avaliar o impacto do número de sinalizações semaforicas no crescimento das agendas de intervalos de luzes verdes;
- Avaliar o impacto de diferentes classes de veículos, utilizando o algoritmo de planejamento e orientação de rotas orientado a ondas verdes;
- Avaliar o tempo de resposta do algoritmo de planejamento e orientação de rotas em mapas viários cujas vias possuem mais de uma faixa;
- Avaliar o tempo de atualização do estado global do sistema multiagente de planejamento e orientação de rotas em função da quantidade de veículos presentes no mapa viário;
- Utilizar os dados publicados por elementos urbanos, de modo que possam ser utilizados para ponderar dinamicamente as vias. Isso seria um recurso bastante útil, pois, em um ambiente urbano, existem áreas, tais como as proximidades de hospitais e escolas, onde o fluxo de veículos precisa ser gerenciado com maiores cuidados. Outra possibilidade seria o uso desses dados em eventos tais como shows, jogos de futebol, entre outros;
- Desenvolver cenários para avaliações experimentais, envolvendo atividades de sensoriamento urbano. Com isso, dispositivos móveis utilizados por pedestres ou sensores instalados em dispositivos computacionais poderiam ser utilizados para alimentar o sistema. Com base nisso, novos critérios de para o cálculo de rotas ótimas poderiam ser explorados.

Referências Bibliográficas

- [1] PAIVA, L. M. *Controle Distribuído de Tráfego com Fluxos Heterogêneos*. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2012.
- [2] KYTE, M., TRIBELHORN, M. *Operation, Analysis, and Design of Signalized Intersections: A Module for the Introductory Course in Transportation Engineering*. Middletown, USA, 2014.
- [3] BAZZAN, A. L. C., KLÜGL, F. *Introduction to Intelligent Systems in Traffic and Transportation*. Lexington, KY, USA, Morgan & Claypool, 2014.
- [4] ZHENG, S., XU, J. “Research on Red Wave and Green Wave Coordinated Control Model in Arterial Road for Different Traffic Demands”. In: *Proceedings of the International Conference on Multimedia Technology*, pp. 1661–1664, Guangzhou, China, 2011.
- [5] BAZZAN, A. L. C. “Opportunities for Multiagent Systems and Multiagent Reinforcement Learning in Traffic Control”, *Autonomous Systems and Multiagent Systems*, v. 18, n. 3, pp. 342–375, 2009.
- [6] DE OLIVEIRA, D., BAZZAN, A., LESSER, V. “Using Cooperative Mediation to Coordinate Traffic Lights: A case study”. In: *Proceedings of the International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, pp. 463–470, Utrecht, 2005.
- [7] CHENG, S., EPELMAN, M., SMITH, R. “CoSIGN: A Parallel Algorithm for Coordinated Traffic Signal Control”, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, v. 7, n. 4, pp. 551–564, 2006.
- [8] MIGDALAS, A. “Bilevel Programming in Traffic Planning: Models, Methods and Challenge”, *Journal of Global Optimization*, v. 7, pp. 381–405, 1995.
- [9] KERNER, B. S. “Theory of Self-Organized Traffic at Signal Light”. Disponível em: <http://arxiv.org/abs/1211.2535>. Acessado em: 21 de junho de 2017, 2012.

- [10] XIE, X.-F., BARLOW, G. J., SMITH, S. F., et al. “Platoon-Based Self-Scheduling for Real Time Traffic Signal Control”. In: *Proceedings of 14th International Conference on Intelligent Transportation Systems*, pp. 879–884, Washington, DC, USA, October 2011.
- [11] XIE, X.-F., BARLOW, G. J., SMITH, S. F., et al. *Self-Scheduling Agents for Real Time Traffic Signal Control*. Relatório Técnico Technical Report CMU-RI-TR-11-06, Robotics Institute – Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, USA, 2011.
- [12] GERHENSON, C. “Self-Organizing Traffic Lights”, *Complex Systems*, v. 16, pp. 29–53, 2005.
- [13] EINHORN, M. D. *An Evaluation of the Efficiency of Self-Organizing versus Fixed Traffic Signalling Paradigms*. Tese de Mestrado, Stellenbosch University, Stellenbosch, South Africa, 2012.
- [14] SLAGER, G., MILANO, M. “Urban Traffic Control System Using Self-Organizing”. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems*, pp. 255–260, Madeira Island, Portugal, 2010.
- [15] HELBING, D., MAZLOUMIAN, A. “Operation Regimes and Slower-Faster Effect in the Control of Traffic Intersections”, *European Physical Journal B*, v. 70, n. 2, pp. 257–274, 2009.
- [16] LÄMMER, S., HELBING, D. “Self-Control of Traffic Lights and Vehicle Flows in Urban Road Networks”, *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, pp. 4–19, 2008.
- [17] KRAUS, S., PARSHANI, R., SHAVIT, Y. “A study on gossiping in transportation networks”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 57, n. 4, pp. 2602–2607, 2008.
- [18] LEONTIADIS, I., MARFIA, G., MACK, D., et al. “On the effectiveness of an opportunistic traffic management system for vehicular networks”, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, v. 12, n. 4, pp. 1537–1548, 2011.
- [19] SCHÜNEMMAN, B., WEDEL, J. W., RADUSH, I. “V2x-based traffic congestion recognition and avoidance, year =2009, booktitle = Proceedings of 10th International Symposium on Pervasive Systems, Algorithms, and Networks, address = Kaohsiung, Taiwan, pages = 637–641” . .

- [20] WEDDE, H. F., SENGE, S. “BeeJamA: A Distributed, Self-Adaptive Vehicle Routing Guidance Approach”, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, v. 14, n. 4, pp. 1882–1895, 2013.
- [21] CLAES, R., HOLVOET, T., WEYNS, D. “A Decentralized Approach for Anticipatory Vehicle Routing Using Delegate Multiagent Systems”, *Transactions on Intelligent Transportation Systems*, v. 12, n. 2, pp. 364–373, 2011.
- [22] IEEE STANDARDS ASSOCIATION. “802.11: Wireless LANs”. Disponível em: <http://standards.ieee.org/about/get/802/802.11.html>. Acessado em: 21 de junho de 2017, 2012a.
- [23] IEEE STANDARDS ASSOCIATION. “802.11p-2010”. Disponível em: <http://standards.ieee.org/findstds/standard/802.11p-2010.html>. Acessado em: 21 de junho de 2017, 2010.
- [24] ZHENG, K., ZHENG, Q., CHATZIMISIOS, P., et al. “Heterogeneous Vehicular Networking: A Survey on Architecture, Challenges and Solutions”, *IEEE Communications & Tutorials*, v. 17, pp. 2377–2396, 2015.
- [25] SOMMER, C., DRESSLER, F. *Vehicular Networking*. Cambridge, UK, Cambridge University Press, 2015.
- [26] BAI, F., KRISHNAMACHARI, B. “Exploiting the wisdom of the crowd: localized, distributed information-centric VANETs [Topics in Automotive Networking]”, *Communications Magazine, IEEE*, v. 48, n. 5, pp. 138–146, May 2010.
- [27] AMADEO, M., CAMPOLO, C., MOLINARO, A. “Information-centric networking for connected vehicles: a survey and future perspectives”, *IEEE Communications Magazine*, v. 54, n. 2, pp. 98–104, February 2016.
- [28] AHLGREN, B., DANNEWITZ, C., IMBRENDA, C., et al. “A survey of information-centric networking”, *IEEE Communications Magazine*, v. 50, n. 7, pp. 26–36, July 2012.
- [29] ARNOULD, G., KHADRAOUI, D., HABBAS, Z. “A Self-organizing Content Centric Network Model for Hybrid Vehicular Ad-hoc Networks”. In: *Proceedings of the First ACM International Symposium on Design and Analysis of Intelligent Vehicular Networks and Applications, DIVA-Net '11*, pp. 15–22, New York, NY, USA, 2011. ACM. ISBN: 978-1-4503-0904-2. doi: 10.1145/2069000.2069004. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/2069000.2069004>>.

- [30] AMADEO, M., CAMPOLO, C., MOLINARO, A. “CRoWN: Content-Centric Networking in Vehicular Ad Hoc Networks”, *Communications Letters, IEEE*, v. 16, n. 9, pp. 1380–1383, September 2012. ISSN: 1089-7798. doi: 10.1109/LCOMM.2012.072012.120282.
- [31] AMADEO, M., CAMPOLO, C., MOLINARO, A. “Enhancing content-centric networking for vehicular environments”, *Computer Networks*, v. 57, n. 16, pp. 3222 – 3234, 2013. ISSN: 1389-1286.
- [32] WANG, L., WAKIKAWA, R., KUNTZ, R., et al. “Data naming in Vehicle-to-Vehicle communications”. In: *Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS), 2012 IEEE Conference on*, pp. 328–333, March 2012.
- [33] WANG, L., AFANASYEV, A., KUNTZ, R., et al. “Rapid Traffic Information Dissemination Using Named Data”. In: *Proceedings of the 1st ACM Workshop on Emerging Name-Oriented Mobile Networking Design - Architecture, Algorithms, and Applications*, NoM '12, pp. 7–12, New York, NY, USA, 2012. ACM. ISBN: 978-1-4503-1291-2. doi: 10.1145/2248361.2248365. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/2248361.2248365>>.
- [34] PERKINS, C. E., BAGHWAT, P. “Highly dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector routing (DSDV) for mobile computers”. In: *Proceedings of the Conference on Communications architectures, Protocols and Applications*, pp. 234–244, New York, NY, USA, August 1994.
- [35] JHONSON, D. B., MALTZ, D. A. “Dynamic Source Routing in Ad Hoc Networks”, *Mobile Computing*, v. 353, pp. 153–181, 1996.
- [36] KARP, B., KUNG, H. T. “GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks”. In: *Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, MobiCom '00, pp. 243–254, New York, NY, USA, 2000. ISBN: 1-58113-197-6.
- [37] YU, Y.-T., LI, X., GERLA, M., et al. “Scalable VANET content routing using hierarchical bloom filters”. In: *Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2013 9th International*, pp. 1629–1634, July 2013.
- [38] WILLKE, T. L., TIENTRAKOOL, P., MAXEMCHUK, N. F. “A Survey of Inter-Vehicule Communication Protocols and Their Applications”, *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, v. 11, n. 2, pp. 3–20, 2009.

- [39] GONÇALVES, F. B., FRANÇA, F. M. G., DE AMORIM, C. L. “Interest-centric vehicular ad hoc network”. In: *Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, pp. 1–10, NY, NY, USA, Oct 2016. doi: 10.1109/WiMOB.2016.7763222.
- [40] DUTRA, R. C., MORAES, H. F., AMORIM, C. L. “Interest-Centric Mobile Ad Hoc Networks”. In: *Proceedings of the 11th IEEE International Symposium on Network Computing and Applications*, pp. 130–138, Cambridge, MA, USA, August 2012.
- [41] FARIA, F. A. R. *Roteamento Ecológico de Veículos Orientados a Ondas Verdes*. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2013.
- [42] GONÇALVES, F. B. “Relatório Técnico: Controle Distribuído de Tráfego Baseado em Veículos Conectados e Comunicações Veiculares Centradas em Interesses”. Available at: <https://arxiv.org/abs/1708.00741>. Accessed in: 21 de junho de 2017, 2016.
- [43] LI, F., WANG, Y. “Routing in Vehicular Ad Hoc Networks: A Survey”, *IEEE Vehicular Technology Magazine*, pp. 12–22, 2007.
- [44] ASLAM, B., AMJAD, F., ZOU, C. C. “Optimal roadside units placement in urban areas for vehicular networks”. In: *Proceedings of the 7th IEEE Symposium on Computers and Communications*, pp. 423–429, Cappadocia, Turkey, July 2012.
- [45] IEEE STANDARDS ASSOCIATION. “802.16: Broadband Wireless Metropolitan Area Networks (MANs)”. Disponível em: <http://standards.ieee.org/about/get/802/802.16.html>. Acessado em: 21 de junho de 2017, 2012b.
- [46] HOSSAIN, E., CHOW, G., LEUNG, V. C. M., et al. “Vehicular Telematics over Heterogeneous Wireless Networks: A survey”, *Computer Communications*, v. 33, pp. 775–793, 2010.
- [47] MENOVAR, H., FILALI, F., LENARDI, M. “A Survey and Qualitative Analysis of MAC Protocols for Vehicular Ad Hoc Networks”, *IEEE Wireless Communications*, v. 13, n. 5, pp. 30–35, 2006.
- [48] PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA. “Código Brasileiro de Trânsito”. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9503Compilado.htm. Acessado em: 21 de junho de 2017, 1997.

- [49] CHOWDHURY, M. A., SADEK, A. *Fundamentals of Intelligent Transportation Systems Planning*. Boston, USA, Artech House Publishers, 2003.
- [50] GARBER, N. J., HOEL, L. A. *Traffic & Highway Engineering*. 4th edition ed. Toronto, Canada, 2009.
- [51] DENATRAN. “MANUAL BRASILEIRO DE SINALIZAÇÃO DE TRÂNSITO VOLUME V – SINALIZAÇÃO SEMAFÓRICA”. Disponível em: http://www.denatran.gov.br/download/Resolucoes/Resolucao4832014_-Anexo.pdf. Acessado em: 21 de junho de 2017, 2014.
- [52] GONÇALVES, F. B., FRANÇA, F. M. G., AMORIM, C. L. “Rede Ad hoc Veicular Centrada em Interesses”. In: *Anais do Workshop de Redes P2P, Dinâmicas, Sociais e Orientadas a Conteúdo*, pp. 61–74, Salvador, BA, BR, Maio 2016.
- [53] DUTRA, R. C., GRANJA, R. S., MORAES, H. F., et al. “REPI: Rede de Comunicação Endereçada por Interesses”. In: *Anais do VI Workshop de Redes Dinâmicas e Sistemas Peer-to-Peer*, pp. 99–112, Gramado, RG, Brasil, Maio 2010.
- [54] BUSCHMANN, F., MEUNIER, R., ROHNERT, H., et al. *Pattern-Oriented Software Architecture, Volume 1: A System of Patterns*. Chichester, UK, Wiley, 1996.
- [55] DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. “User Service Bundles and User Services”. Disponível em: <http://local.iteris.com/itsarch/html/user/userserv.htm>. Acessado em: 21 de junho de 2017, 2016.
- [56] GAMMA, E., HELM, R., JHONSON, R., et al. *Padrões de Projeto: Soluções reutilizáveis de software orientado a objetos*. Porto Alegre, Brasil, Bookman, 2000.
- [57] SCHMIDT, D., STAL, M., ROHNERT, H., et al. *Pattern-Oriented Software Architecture: Patterns for concurrent and networked objects*, v. 2. NJ, USA, Wiley, 2001.
- [58] FERREIRA, M., FERNANDES, R., CONCEIÇÃO, H., et al. “Self-organized Traffic Control”. In: *Proceedings of the Seventh ACM International Workshop on Vehicular InterNetworking, VANET '10*, pp. 85–90, New York, NY, USA, 2010. ACM. ISBN: 978-1-4503-0145-9. doi: 10.1145/1860058.1860077. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/1860058.1860077>>.

- [59] GHODSI, A., KOPONEN, T., RAJAHALME, J., et al. “Naming in Content-oriented Architectures”. In: *Proceedings of the ACM SIGCOMM Workshop on Information-centric Networking, ICN '11*, pp. 1–6, New York, NY, USA, 2011. ACM. ISBN: 978-1-4503-0801-4. doi: 10.1145/2018584.2018586. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/2018584.2018586>>.
- [60] BARBOSA, V. C., BENEVIDES, M. R. F., FRANÇA, F. M. G. “Sharing Resources at Nonuniform Access Rates”, *Theory of Computing Systems*, v. 34, pp. 13–26, 2001.
- [61] SANTOS, A. A. D. *Escalonamento Distribuído Livre de Colisões para Redes de Sensores sem Fio com Múltiplas Fontes*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2012.
- [62] SOMMER, C. “Veins”. Disponível em: <http://veins.car2x.org/>. Acessado em: 21 de junho de 2017, 2014.
- [63] OPEN SIM. “OMNeT++ Network Simulation Framework”. Disponível em: <http://www.omnetpp.org/>. Acessado em: 21 de junho de 2017, 2014.
- [64] NARDINI, G., STEA, G., VIRDIS, A. “LTE User Plane Simulation Model for INET & OMNeT++”. Disponível em: <http://simulte.com/>. Acessado em: 21 de junho de 2017, 2016.
- [65] GERMAN AEROSPACE CENTER, INSTITUTE OF TRANSPORTATION SYSTEMS. “SUMO: Simulation of Urban Mobility”. Disponível em: <http://sumo-sim.org/>. Acessado em: 21 de junho de 2017, 2014.
- [66] GONÇALVES, F. B., FRANÇA, F. M. G., AMORIM, C. L. “RAdNet-VE: An Interest-Centric Mobile Ad Hoc Network for Vehicular Environments”. Available at: <https://arxiv.org/abs/1604.00589>. Accessed in: 21 de junho de 2017, 2016.