



Universidade Federal do Piauí
Centro de Ciências da Natureza
Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação

Protocolo de Sinalização de Congestionamento para Redes Veiculares

Roniel Soares de Sousa

Teresina-PI, Junho de 2016

Roniel Soares de Sousa

Protocolo de Sinalização de Congestionamento para Redes Veiculares

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da UFPI (área de concentração: Sistemas de Computação), como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Ciência da Computação.

Universidade Federal do Piauí – UFPI

Centro de Ciências da Natureza

Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação

Orientador: André Castelo Branco Soares

Teresina-PI

Junho de 2016

Agradecimentos

Agradeço a Deus.

Agradeço aos meus pais, Neube Fernandes de Sousa e Naidles Soares de Sousa, pela educação que me foi dada e por sempre terem acreditado em mim.

À minha namorada, Katharinne Sabrina Nascimento Teixeira, pelo amor e companheirismo durante toda esta etapa.

Ao meu irmão, por toda a ajuda e por sempre estar presente na minha vida.

Agradeço também aos meus padrinhos, Nora Ney Soares de Sousa e João Almiro Lustosa, por terem sido fundamentais na minha educação e por sempre terem me apoiado.

Agradeço ao meu orientador, André Castelo Branco Soares, por todos os conselhos, pela paciência e ajuda neste e em outros períodos.

Aos professores que contribuíram de forma direta ou indireta para a minha formação.

À CAPES e UFPI, pelo apoio financeiro para a realização deste trabalho de pesquisa.

E por fim, a todos os demais colegas e familiares que contribuíram para a minha formação e para a realização deste trabalho.

Resumo

Os aumentos dos congestionamentos de trânsito em grandes cidades causam impactos negativos em diversas áreas, como na saúde e economia. Os Sistemas Inteligentes de Transporte, que utilizam tecnologias como laços indutivos, Sistema de Posicionamento Global (*Global Positioning System* - GPS), câmeras de vídeos, sensores e comunicação sem fio, são vistos como uma das principais alternativas para diminuir estes congestionamentos (ajuste dinâmico nos temporizadores de semáforos, monitoramento de tráfego, etc.). Com isso, diversas soluções para o controle de congestionamentos baseadas na comunicação entre veículos vêm sendo propostas. Uma das tecnologias utilizadas para a comunicação no ambiente veicular são as redes veiculares. A comunicação nas redes veiculares pode ocorrer de Veículo para Veículo (V2V) ou de Veículo para Infraestrutura (V2I). A instalação e manutenção de infraestruturas necessárias para cobrir completamente as áreas urbanas podem apresentar altos custos. Com isso, este trabalho apresenta um novo protocolo de sinalização de congestionamento para redes veiculares com baixo *overhead* de comunicação. O protocolo utiliza apenas a comunicação V2V, em outras palavras, é independente de infraestruturas externas. O objetivo do protocolo é reduzir o tempo médio de viagem dos veículos garantindo um baixo *overhead* de comunicação na rede veicular. Foi realizado um estudo de avaliação de desempenho com o objetivo de comparar a solução proposta com os trabalhos relacionados. O protocolo proposto apresentou o melhor desempenho em termos de *overhead* de sinalização. Nos cenários com maior demanda de tráfego, a quantidade de mensagens geradas pelo protocolo proposto foi aproximadamente 43% menor que o segundo melhor resultado e 80% menor que o protocolo que apresentou o pior desempenho. Por meio do mesmo estudo verificou-se a eficiência do protocolo em reduzir os congestionamentos nos cenários avaliados. Foi obtida uma redução de até 22% no tempo médio de viagem dos veículos.

Palavras-chave: congestionamento de trânsito. redes veiculares. roteamento. protocolo de sinalização.

Abstract

The increase in traffic congestion in big cities causes negative impacts on several areas, such as health and economy. The Intelligent Transportation Systems that use technologies such as inductive loops, Global Positioning System (GPS), cameras, videos, sensors and wireless communication are seen as one of the main alternatives to reduce these traffic jams (dynamic adjustment of traffic light timers, traffic monitoring, etc). Thus, several solutions for traffic monitoring based on vehicular communications have been proposed. One of the technologies used for communication in the vehicular environment are the vehicular networks. The communication on vehicular networks may occur from Vehicle to Vehicle (V2V) or from Vehicle to Infrastructure (V2I). The installation and maintenance of the infrastructures necessary to completely cover the urban areas may have high costs. Therefore, this work presents a new congestion signaling protocol for vehicular networks with low communication overhead. The protocol uses only V2V communications, in other words, is independent of external infrastructures. The aim of the protocol is to reduce the average travel time of vehicles ensuring low overhead communication in a vehicular network. A performance evaluation study was conducted in order to compare the new solution with the related work. The proposed solution was the most efficient in terms of signaling overhead. In the scenarios with higher traffic demand, the amount of messages generated by the proposed protocol was about 43% less than the second best result and 80% less than the protocol that presented the worst performance. At the same study, it was found the protocol efficiency in reducing congestion in the evaluation scenarios. A reduction of up to 22% in average travel time of the vehicles was obtained.

Keywords: traffic congestion. vehicular networks. routing. signaling protocol.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Arquiteturas em redes veiculares. Figura retirada de (ALVES; CAMPBELL; COUTO, 2009).	6
Figura 2 – Arquitetura WAVE	8
Figura 3 – Alocação de canais de rádio pela FCC. Figura retirada de (IEEE. . . , 2014).	9
Figura 4 – Custo dos congestionamentos nos Estados Unidos.	12
Figura 5 – ABEONA: Estimativa local de densidade. Figura retirada de (GRAMAGLIA; CALDERON; BERNARDOS, 2014).	16
Figura 6 – Funções de pertinência para os conjuntos fuzzy e conjunto de saída utilizados no CARTIM. Retirado de (ARAÚJO et al., 2014)	18
Figura 7 – Ilustração dos parâmetros veiculares utilizados no trabalho de (GUPTE; YOUNIS, 2012). Figura retirada de (GUPTE; YOUNIS, 2012).	19
Figura 8 – Uma decisão de rota com três rotas alternativas. Figura retirada de (GARIP et al., 2015).	20
Figura 9 – Definição de vias.	23
Figura 10 – Resultados da quantificação do congestionamento de um veículo e sua velocidade.	25
Figura 11 – Definição de <i>clusters</i>	26
Figura 12 – Escolha do <i>cluster-head</i> para disseminação do <i>ELC</i>	27
Figura 13 – Nível de congestionamento que o veículo calculou localmente por meio de sua velocidade e o nível de congestionamento recebido de outros veículos para a via atual.	28
Figura 14 – Etapas para decidir se o veículo deve transmitir as informações em <i>broadcast</i> de múltiplos saltos.	28
Figura 15 – Mapa do cenário <i>Manhattan Grid</i>	31
Figura 16 – Quantidade média de mensagens transmitidas pelos veículos.	32
Figura 17 – Quantidade média de mensagens geradas por cada veículo em Roniel e <i>Milojevic</i> , desconsiderando as retransmissões.	33
Figura 18 – Tempo médio levado por cada veículo para concluir o trajeto.	34
Figura 19 – Explicação do desempenho de <i>Mevlut</i>	35
Figura 20 – Distância média percorrida por cada veículo.	36
Figura 21 – Porcentagem de veículos que completaram o seu percurso.	36
Figura 22 – Emissão média de CO ₂ pelos veículos.	37
Figura 23 – Mapa da cidade de Luxemburgo utilizado nas simulações. Figura adaptada de (CODECA; FRANK; ENGEL, 2015).	38
Figura 24 – Quantidade de veículos ao longo das 24 horas.	39

Figura 25 – Tempo médio levado por cada veículo para concluir o trajeto no cenário <i>LuST</i>	40
Figura 26 – Distância média percorrida por cada veículo no cenário <i>LuST</i>	40
Figura 27 – Porcentagem de veículos que completaram o seu percurso no cenário <i>LuST</i>	41
Figura 28 – Emissão média de CO ₂ pelos veículos no cenário <i>LuST</i>	42

Lista de tabelas

Tabela 1 – Custos dos congestionamentos, em bilhões de dólares.	12
Tabela 2 – Estimativas monetárias dos custos sociais referentes à emissão adicional de CO_2 por conta dos congestionamentos, em milhões de dólares. . . .	12
Tabela 3 – Classificação dos trabalhos relacionados	14
Tabela 4 – Valores utilizados no estudo de avaliação de desempenho para os parâmetros do protocolo proposto	30
Tabela 5 – Parâmetros utilizados nas simulações do cenário <i>Manhattan Grid</i>	32
Tabela 6 – Valores referentes à topologia do cenário <i>LuST</i>	38
Tabela 7 – Parâmetros utilizados nas simulações do cenário <i>LuST</i>	39

Lista de abreviaturas e siglas

BSS	<i>Basic Service Set</i>
CAM	<i>Cooperative Awareness Messages</i>
CCH	<i>Control Channel</i>
CTA	<i>Congestion Traffic Avoid</i>
DSRC	<i>Dedicated Short Range Communications</i>
ELC	Estimativa Local de Congestionamento
FCC	<i>Federal Communications Commission</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
IPv6	<i>Internet Protocol Version 6</i>
ITS	<i>Intelligent Transportation Systems</i>
LLC	<i>Logical Link Control</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
OBU	<i>Onboard Unit</i>
PHY	<i>Physical Layer</i>
RSU	<i>Roadside Unit</i>
SCH	<i>Service Channel</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TLS	<i>Transport Layer Security</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
UK	<i>United Kingdom</i>
V2I	<i>Vehicle-to-Infrastructure</i>

V2V	<i>Vehicle-to-Vehicle</i>
VIL	<i>Virtual Induction Loop</i>
VANET	<i>Vehicular Ad hoc Network</i>
WAVE	<i>Wireless Access in Vehicular Environments</i>
WSM	<i>WAVE Short Message</i>
WSMP	<i>WAVE Short Message Protocol</i>

Lista de símbolos

V_c	Velocidade corrente
V_t	Limiar de velocidade
C_L	Nível de congestionamento local
Int_c	Intervalo de tempo para incremento do nível de congestionamento
Int_{nc}	Intervalo de tempo para diminuição do nível de congestionamento
V_{id}	Velocidade máxima permitida na via com identificador <i>id</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivos	2
1.2	Organização da Dissertação	3
2	REDES VEICULARES	5
2.1	Principais Características	5
2.2	Padrões em Redes Veiculares	6
2.3	Aplicações de Redes Veiculares	9
3	CONGESTIONAMENTOS DE TRÂNSITO E REDES VEICULARES	11
3.1	Caracterização do Problema	11
3.2	Classificação das Soluções que utilizam Redes Veiculares para Redução de Congestionamentos	13
3.3	Principais Soluções para Redução de Congestionamentos	14
3.3.1	<i>ABEONA Monitored Traffic: VANET-Assisted Cooperative Traffic Congestion Forecasting</i>	15
3.3.2	<i>Distributed Road Traffic Congestion Quantification Using Cooperative VANETs</i>	16
3.3.3	<i>Um Protocolo de Identificação e Minimização de Congestionamentos de Tráfego para Redes Veiculares</i>	17
3.3.4	<i>Vehicular Networking for Intelligent and Autonomous Traffic Management</i>	18
3.3.5	<i>Scalable Reactive Vehicle-to-Vehicle Congestion Avoidance Mechanism</i>	18
3.4	Considerações Finais	20
4	PROTOCOLO DE BAIXO OVERHEAD PARA REDUÇÃO DE CONGESTIONAMENTOS EM REDES VEICULARES	23
4.1	Detecção e Quantificação de Congestionamento	23
4.2	Disseminação de Informação	25
4.3	Minimização de Congestionamento	29
4.4	Avaliação de Desempenho	29
4.4.1	<i>Manhattan Grid</i>	30
4.4.1.1	<i>Overhead de Sinalização</i>	31
4.4.1.2	<i>Redução no Tempo Médio de Viagem dos Veículos</i>	33
4.4.2	<i>LuST</i>	37
5	CONCLUSÕES	43

REFERÊNCIAS 45

1 Introdução

A mobilidade urbana é um dos principais desafios encontrados nas grandes metrópoles atualmente. Os constantes aumentos dos congestionamentos de trânsito causam impactos negativos em diversas áreas, como na economia, no meio ambiente e na saúde. Um estudo realizado pela Fundação Getúlio Vargas mostra que os congestionamentos causaram prejuízos de cerca de R\$ 40 bilhões na cidade de São Paulo, somente no ano de 2012 (CINTRA, 2013). Uma das formas apontadas para reduzir este problema é o incentivo ao uso do transporte público (TRANSPORT, 2013). De forma alternativa, os Sistemas Inteligentes de Transportes (*Intelligent Transportation Systems* - ITS) são vistos como um dos principais meios com potencialidade para resolver o problema da mobilidade urbana em grandes cidades (AISSAOUI et al., 2014). Os ITS são sistemas que utilizam tecnologias como: laços indutivos, Sistema de Posicionamento Global (*Global Position System* - GPS), câmeras de vídeos, sensores e comunicação sem fio. Dentre estas tecnologias, a comunicação sem fio no ambiente veicular vem ganhando destaque na comunidade científica. Este tipo de comunicação forma as redes veiculares. Com isso, diversas soluções para o monitoramento de tráfego baseadas na comunicação entre veículos vêm sendo propostas (ARAÚJO et al., 2014), (GRAMAGLIA; CALDERON; BERNARDOS, 2014), (SILVA et al., 2013), (WISCHOFF et al., 2003), (YOUNES; BOUKERCHE, 2013), (AISSAOUI et al., 2014), (MILOJEVIC; RAKOCEVIC, 2014), (GARIP et al., 2015).

As redes veiculares, conhecidas como VANETs (*Vehicular Ad Hoc Networks*), são redes que permitem a troca de informações entre veículos (comunicação V2V - *Vehicle-to-Vehicle*) e entre veículos e infraestruturas localizadas às margens das vias (comunicação V2I - *Vehicle-to-Infrastructure*). O ambiente em que as VANETs estão inseridas possuem características particulares que representam desafios na comunicação entre veículos. Algumas dessas características são: (i) a alta mobilidade dos nós, (ii) mudanças constantes na topologia da rede, (iii) a existência de redes densas que ocasionam em altas taxas de perdas de pacotes por congestionamento na rede e (iv) a existência de redes esparsas que dificultam a disseminação de informações (ALVES; CAMPBELL; COUTO, 2009). As perdas de pacotes por congestionamento na rede ocorrem devido a um problema conhecido como tempestade de *broadcast* (WISITPONGPHAN et al., 2007). Por causa da existência de aplicações sensíveis ao atraso na transmissão de mensagens, como as aplicações de segurança no trânsito, é desejado que as propostas para as redes veiculares tenham como objetivo um baixo *overhead* de comunicação (WISITPONGPHAN et al., 2007).

As aplicações de redes veiculares podem ser divididas em três classes: segurança no trânsito, entretenimento e assistência ao motorista. O principal desafio para as aplicações de segurança é divulgar rapidamente as informações. Isso se faz necessário para que o

condutor tenha tempo para reagir a situações nas quais podem ocorrer acidentes de trânsito. Nas aplicações de entretenimento destacam-se os sistemas de compartilhamento de conteúdo (músicas, filmes) e jogos. Já as aplicações de assistência ao motorista são aquelas que auxiliam o condutor, por exemplo, transmitindo informações sobre as condições de trânsito (ALVES; CAMPBELL; COUTO, 2009).

Este trabalho de mestrado tem foco no monitoramento de tráfego e nos congestionamentos veiculares, visando a redução do tempo de viagem dos veículos por meio da tecnologia de redes veiculares. Um dos objetivos é garantir um baixo *overhead* de comunicação. É apresentada uma revisão da literatura sobre as principais soluções para a redução de congestionamentos utilizando redes veiculares.

A instalação e manutenção de infraestruturas necessárias para cobrir completamente determinada área urbana pode apresentar altos custos (GARIP et al., 2015). Com isso, este trabalho estuda soluções para o controle de congestionamentos que utilizam a tecnologia de redes veiculares e que fazem o uso apenas da comunicação V2V.

É importante mencionar a existência de tecnologias diferentes das redes veiculares que possibilitam a redução dos tempos de viagem dos veículos. Atualmente destacam-se sistemas que utilizam conteúdos gerados por usuários para criar informações sobre as condições de tráfego em tempo real (WAZE, 2006). Estes sistemas funcionam de forma centralizada e necessitam que os usuários utilizem *smartphones* conectados a uma rede de dados. A imposição de conexão com uma rede de dados representa um ponto negativo para este tipo de solução, já que os usuários precisam arcar mensalmente com os custos referentes às redes de dados. Destacam-se também os problemas inerentes aos sistemas centralizados, tais como o atraso na obtenção de dados e a existência de um ponto único de falha (GARIP et al., 2015).

1.1 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é propor um novo protocolo de baixo *overhead* de sinalização para roteamento de veículos em ambientes urbanos utilizando a tecnologia de redes veiculares. O protocolo tem como finalidade reduzir o tempo médio de viagem dos veículos.

Com o intuito de alcançar o objetivo geral, faz-se necessária a conclusão dos seguintes objetivos específicos:

1. Realizar um levantamento sobre as principais soluções para redução de congestionamentos veiculares que utilizam a tecnologia de redes veiculares.
2. Desenvolver um novo protocolo para roteamento de veículos em ambientes urbanos.

Além de reduzir o tempo de viagem dos veículos, esse protocolo deve apresentar um baixo *overhead* de sinalização.

3. Realizar um levantamento sobre as principais ferramentas de simulação utilizadas no estudo de avaliação de desempenho de redes veiculares.
4. Avaliar o novo protocolo proposto por meio de simulação. O desempenho do protocolo deve ser comparado com as principais soluções encontradas na literatura.

1.2 Organização da Dissertação

O restante deste trabalho está organizado como segue.

O Capítulo 2 apresenta uma introdução às redes veiculares. São exibidos os seus principais conceitos e características, bem como o histórico da padronização da comunicação no ambiente veicular. Por fim, listam-se alguns exemplos de aplicações das redes veiculares.

O Capítulo 3 caracteriza o problema estudado neste trabalho e descreve os principais trabalhos da literatura para a redução de congestionamentos que utilizam as redes veiculares.

O Capítulo 4 apresenta o novo protocolo desenvolvido no âmbito deste trabalho de mestrado para redução de congestionamentos de veículos. O protocolo proposto foi publicado no XXXIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SOUSA; SOARES, 2015). No mesmo capítulo é apresentado o estudo de avaliação de desempenho do protocolo proposto em comparação com os trabalhos relacionados.

O Capítulo 5 discute as conclusões desta dissertação bem como propostas para trabalhos futuros.

2 Redes Veiculares

Este capítulo aborda os principais aspectos das redes veiculares. A Seção 2.1 apresenta os conceitos e características inerentes às VANETs. A Seção 2.2 apresenta os padrões das Redes Veiculares. Discute-se a evolução da padronização da comunicação no ambiente veicular com o objetivo de apresentar o estado da arte desta tecnologia. Por fim, a Seção 2.3 classifica e exemplifica as aplicações das redes veiculares.

2.1 Principais Características

As redes veiculares permitem a troca de informações entre veículos (comunicação V2V - *Vehicle-to-Vehicle*) e entre veículos e infraestruturas localizadas às margens das vias (comunicação V2I - *Vehicle-to-Infrastructure*) (BOOYSEN; ZEADALLY; ROOYEN, 2011).

A arquitetura das redes veiculares pode ser caracterizada de acordo com o tipo de comunicação existente. A Figura 1 ilustra as três principais arquiteturas que são: 1) *ad hoc* puro, 2) infra estruturada e 3) híbrida (ALVES; CAMPBELL; COUTO, 2009). Na arquitetura *ad hoc* puro, a comunicação ocorre apenas de veículo para veículo (comunicação V2V). A principal vantagem desta arquitetura é o baixo custo, pois ela não necessita da instalação de infraestruturas externas. Porém, a sua principal desvantagem está na conectividade da rede que é afetada pela densidade e mobilidade dos veículos. Já a arquitetura infra estruturada é caracterizado pela comunicação entre veículos e infraestruturas localizadas nas margens das vias. Tais infraestruturas, chamadas de RSUs (*Road Side Units*), são nós estacionários que podem trocar informações com veículos. Esta arquitetura tem como principal benefício uma maior conectividade da rede, tendo em vista que as RSUs poderão ser posicionadas de modo que a rede permaneça conectada. Por outro lado, um maior custo para implantação e manutenção das RSUs representa uma desvantagem para a arquitetura infra estruturada (GARIP et al., 2015). A arquitetura híbrida, definida pela existência dos dois tipos de comunicação (comunicação V2X), tenta obter o melhor das duas arquiteturas. Neste caso, uma quantidade mínima de RSUs é posicionada para aumentar a conectividade da rede sem elevar demasiadamente seu custo.

O ambiente em que os veículos estão inseridos possui uma série de características que trazem desafios para a comunicação sem fio. Cita-se os seguintes exemplos:

- A alta mobilidade dos veículos ocasiona em mudanças constantes na topologia da rede. Por exemplo, dois veículos que possuem raio de comunicação de 1.000 metros viajando em uma mesma via, em direções opostas, com a velocidade de 120

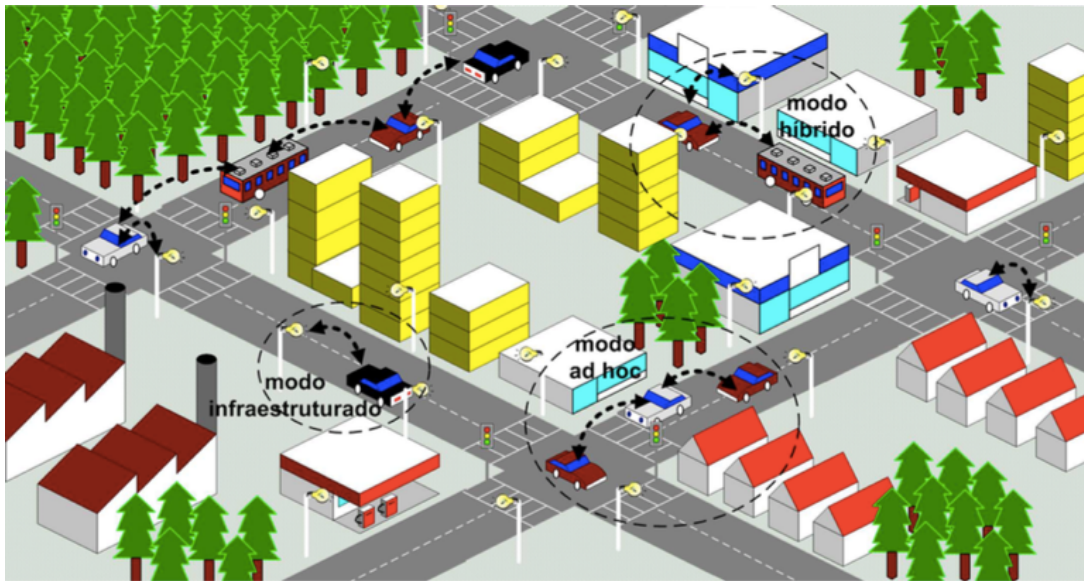


Figura 1 – Arquiteturas em redes veiculares. Figura retirada de (ALVES; CAMPBELL; COUTO, 2009).

km/h, permanecerão conectados por apenas 30 segundos (BOOYSEN; ZEADALLY; ROOYEN, 2011).

- A ocorrência do efeito *doppler*. Quando um veículo transmite um sinal de rádio, movendo-se a uma alta velocidade em relação ao veículo receptor, a frequência do sinal recebido pode diferenciar da emitida em até 300 Hz (FEUKEU; DJOUANI; KURIEN, 2013) (XIE et al., 2015) (FEUKEU; NGWIRA; ZUVA, 2015).
- Situações de congestionamentos de trânsito podem ocasionar em sobrecarga do meio sem fio, acarretando em perdas de pacotes por colisões (ZHANG; CAHILL, 2011)
- Situações com baixa densidade de veículos diminuem a conectividade da rede.
- A ocorrência da deterioração da potência do sinal recebido quando uma transmissão é bloqueada por prédios, carros etc. (SOMMER et al., 2011).

Estas características fazem com que os protocolos existentes para outros tipos de redes não sejam adequados para as redes veiculares (ALVES; CAMPBELL; COUTO, 2009). Assim, faz-se necessário o estudo e desenvolvimento de novos protocolos cientes das características específicas do ambiente veicular.

2.2 Padrões em Redes Veiculares

Na década de 90 ocorreu a primeira tentativa de padronização da comunicação em ambiente veicular. *Dedicated Short Range Communication* (DSRC) era a principal nomenclatura utilizada na época para fazer referência à comunicação entre veículos. No ano

de 1999 a Comissão Federal de Comunicações (FCC) dos Estados Unidos alocou 75 MHz do espectro de frequências, na faixa de 5.9 GHz, para serem utilizados especificamente em Sistemas Inteligentes de Transporte (FCC, 1999). Apenas em 2008, o Instituto Europeu de Normas de Telecomunicações (ETSI) alocou 30 MHz do espectro de frequências na mesma faixa para ITS (ETSI, 2008).

Desde o ano de 2004 um grupo de trabalho do IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) vem desenvolvendo a família de padrões WAVE (*Wireless Access in the Vehicular Environment*). O objetivo deste grupo de trabalho é permitir o desenvolvimento de dispositivos WAVE que podem se comunicar com baixa latência e baixo *overhead* em apoio ao transporte seguro, eficiente e sustentável. Com isso, tais dispositivos poderão aumentar o conforto e conveniência dos usuários (IEEE..., 2014). A nomenclatura WAVE é a mais utilizada atualmente para se referenciar à comunicação veicular. A Figura 2 apresenta a arquitetura WAVE e aponta alguns dos documentos publicados pelo grupo de trabalho para padronização da arquitetura, tais como:

- ***IEEE Std 802.11-2012, IEEE Standard for Information technology - Telecommunications and information exchange between systems-Local and metropolitan area networks-Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications***

Especifica uma subcamada de Controle de Acesso ao Meio (MAC) e várias camadas físicas (PHYs). O IEEE Std 802.11p-2010 está incorporado ao IEEE Std 802.11-2012 e especifica um conjunto de extensões para o IEEE Std 802.11-2012 operar fora de um contexto de um conjunto de serviços básicos (BSS).

- ***IEEE Std 1609.2-2013, IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Security Services for Applications and Management Messages***

Especifica serviços de segurança para aplicações e mensagens de gerenciamento.

- ***IEEE Std 1609.3-2010, IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Networking Services***

Especifica serviços de rede requeridos para a operação de um sistema WAVE e inclui as seguintes características: 1) *WAVE Short Message Protocol*, 2) *WAVE Service Advertisements* e 3) agendamento de canais.

- ***IEEE Std 1609.4-2010, IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Multi-Channel Operation***

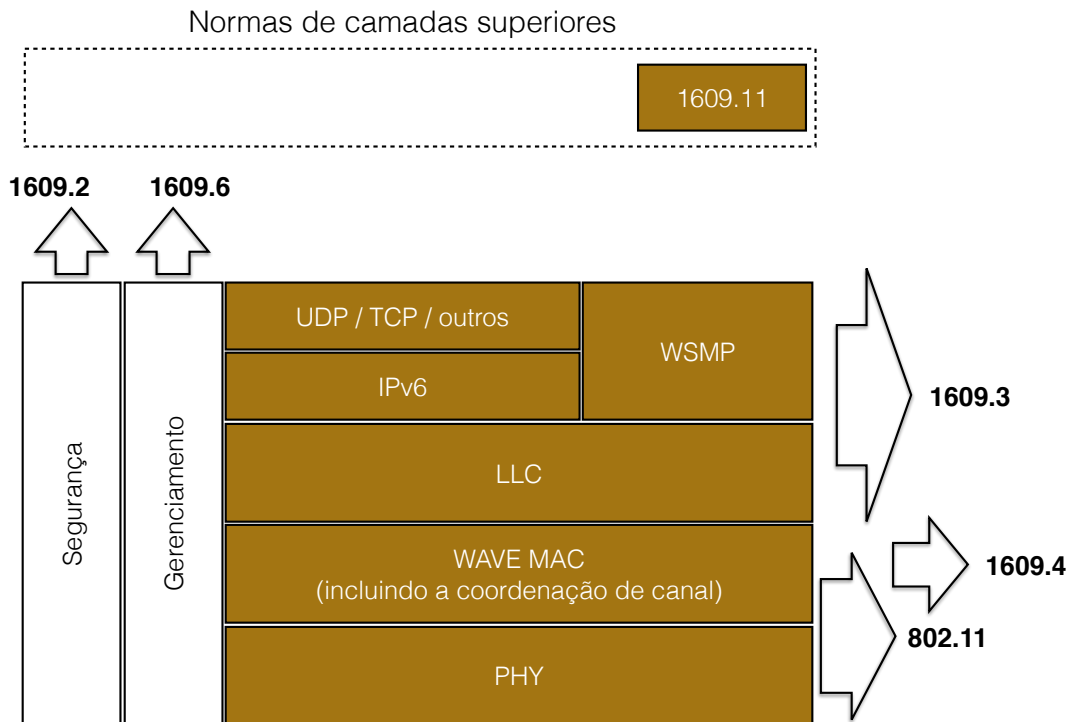


Figura 2 – Arquitetura WAVE. Figura adaptada de (IEEE..., 2014).

Especifica extensões para o protocolo da camada MAC IEEE 802.11, tais como: 1) temporização e comutação de canal e 2) uso do IEEE 802.11 fora do contexto de um BSS.

- **IEEE Std 1609.11-2010, IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Over-the-Air Electronic Payment Data Exchange Protocol for Intelligent Transportation Systems (ITS)**

Primeiro protocolo da camada de aplicação do padrão IEEE 1609. Define um protocolo de pagamentos para, por exemplo, cobranças eletrônicas.

Ainda na Figura 2, observa-se que o documento IEEE 1609.3 define duas pilhas de protocolos que podem ser utilizadas na transmissão de dados, ambas compartilhando os mesmos protocolos nas camadas de enlace e física. A primeira pilha é referente ao protocolo da internet versão 6 (IPv6), e a segunda ao protocolo *WAVE Short Message Protocol* (WSMP). O WSMP é um protocolo projetado especificamente para otimizar as operações da comunicação sem fio em ambientes veiculares. A arquitetura WAVE distingue os canais de comunicação em canais de controle, que são reservados às mensagens WSMP, e canais de serviço, que podem utilizar tanto o WSMP quanto o IPv6 (IEEE..., 2016).

Como mencionado anteriormente, a FCC alocou uma faixa de 75 MHz do espectro de frequências para ser utilizada por dispositivos WAVE. A divisão dessa faixa em canais

é apresentada na Figura 3. São seis canais de serviço e um de controle. Destacam-se os canais de serviço 172 e 184, que são destinados a aplicações de segurança pública. Os canais de serviço 174, 176, 180 e 182 podem ser utilizados pelas demais aplicações, como aplicações de gerenciamento de trânsito (IEEE..., 2014).

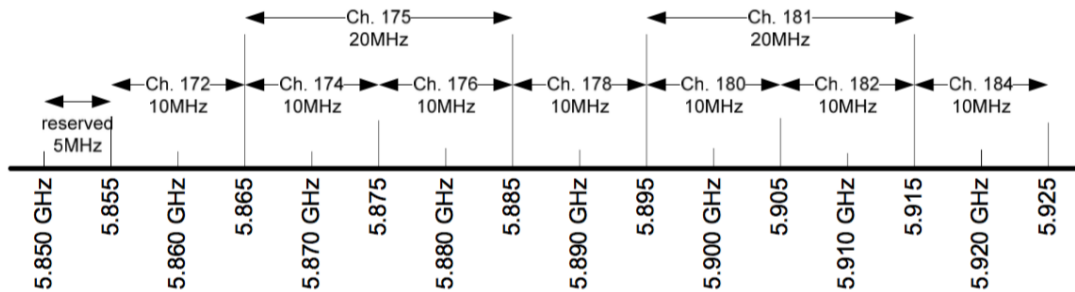


Figura 3 – Alocação de canais de rádio pela FCC. Figura retirada de (IEEE..., 2014).

O conceito de redes veiculares permite ainda a utilização de tecnologias de comunicação diferentes do padrão 802.11p, tais como o *Long Term Evolution* (LTE) (MÖLLER; KÜRNER, 2015) (MIR; FILALI, 2014). Porém, destaca-se que este trabalho se restringe ao uso do padrão 802.11p para a comunicação entre veículos.

2.3 Aplicações de Redes Veiculares

As redes veiculares possibilitam a criação de uma diversidade de aplicações. A literatura divide tais aplicações em três classes: segurança no trânsito, entretenimento e assistência ao motorista (ALVES; CAMPBELL; COUTO, 2009). As aplicações de segurança no trânsito têm como principal desafio divulgar rapidamente as informações. Por esse motivo são destinados canais específicos para as aplicações de segurança (IEEE..., 2014) (INTELLIGENT..., 2010). Alguns exemplos de aplicações de segurança são: serviços de SOS, alerta sobre risco de colisões e alerta sobre colisões (KARAGIANNIS et al., 2011). Como exemplos de aplicações de entretenimento, têm-se os sistemas de compartilhamento de conteúdo (músicas, filmes) e jogos. As aplicações de assistência ao motorista buscam auxiliar o condutor, por exemplo, informando sobre as condições de trânsito (ALVES; CAMPBELL; COUTO, 2009). Outros exemplos de aplicações de assistência ao motorista são: alerta sobre violação de sinal de trânsito, assistência em cruzamentos, alerta sobre aproximação de ambulância, extensão das sinalizações de trânsito e alerta de ultrapassagem (KARAGIANNIS et al., 2011).

As aplicações relacionadas ao monitoramento e controle de tráfego vêm chamando bastante atenção da comunidade científica (SOUSA; SOARES, 2015) (GERALDO; CAMPISTA; COSTA, 2013) (GRAMAGLIA; CALDERON; BERNARDOS, 2014) (AISSAOUI et al., 2014) (MILOJEVIC; RAKOCEVIC, 2014) (YOUNES; BOUKERCHE, 2013) (XU et al., 2014) (ARAÚJO et al., 2014) (BELLAVISTA; FOSCHINI; ZAMAGNI, 2014) (GUPTE;

YOUNIS, 2012) (WISCHOFF et al., 2003) (GARIP et al., 2015). Essas aplicações têm a capacidade de transmitir informações das condições de tráfego para as unidades gestoras de trânsito e informar os motoristas sobre as melhores rotas a serem escolhidas. Assim, o principal objetivo destes trabalhos é a redução dos congestionamentos e dos tempos de viagem dos veículos. Por isso, este tipo de aplicação pertence à classe de aplicações de assistência ao motorista. É neste contexto que se encontra este trabalho de mestrado. É proposto um novo protocolo de baixo *overhead* para a redução do tempo médio de viagem dos veículos utilizando a tecnologia de redes veiculares e independente da existência de unidades de acostamento.

3 Congestionamentos de Trânsito e Redes Veiculares

Este capítulo caracteriza o problema dos congestionamentos de trânsito e apresenta as principais soluções que utilizam as redes veiculares para a redução de congestionamentos. A Seção 3.1 discute sobre os congestionamentos de trânsito apresentando estudos acerca do impacto deste problema nas mais diversas áreas, como na economia, na saúde e no meio ambiente. A Seção 3.2 classifica as soluções para os congestionamentos de trânsito que utilizam as redes veiculares. Por fim, a Seção 3.3 descreve as principais soluções encontradas na literatura que objetivam a redução dos congestionamentos de trânsito por meio das redes veiculares.

3.1 Caracterização do Problema

Áreas urbanas de diferentes tamanhos têm experimentado congestionamentos de veículos cada vez maiores. Os problemas que os motoristas enfrentam são diversos, como o tempo extra de viagem, o custo do combustível desperdiçado e a perda de produtividade (SCHRANK; EISELE; BAK, 2015).

Um relatório baseado em dados coletados em regiões urbanas dos Estados Unidos da América mostra o crescimento dos prejuízos causados por congestionamentos de trânsito desde o ano de 1982 até o ano de 2014 (SCHRANK; EISELE; BAK, 2015). Segundo o relatório, no ano de 2014 os motoristas, em média, passaram 42 horas a mais em vias e gastaram cerca de 960 dólares adicionais em combustível por causa das condições do trânsito. O gráfico da Figura 4 mostra o crescimento dos custos devido ao tempo extra de viagem e ao desperdício de combustível. Esses custos foram de 42, 114 e 160 bilhões de dólares, nos anos de 1982, 2000 e 2014, respectivamente. Vale ressaltar que não estão inclusos os custos referentes a atrasos em entregas de mercadorias, perdas de reuniões pelos motoristas, etc.

Em (CEBR, 2014) é apresentado um estudo com o objetivo de avaliar os custos econômicos e ambientais, diretos e indiretos, no Reino Unido (UK), França, Alemanha e Estados Unidos (EUA) que resultam dos congestionamentos nas vias. Foram consideradas três fontes de custos: 1) tempo perdido pelos motoristas, 2) combustível desperdiçado e 3) impacto negativo dos congestionamentos no meio ambiente. O estudo também apresenta uma estimativa do crescimento destes custos até o ano de 2030. Concluiu-se que os gastos somados nestes quatro países foram de aproximadamente 202,7 bilhões de dólares no ano de 2013 e esse valor pode aumentar em 46% até o ano de 2030, alcançando cerca de 293,1

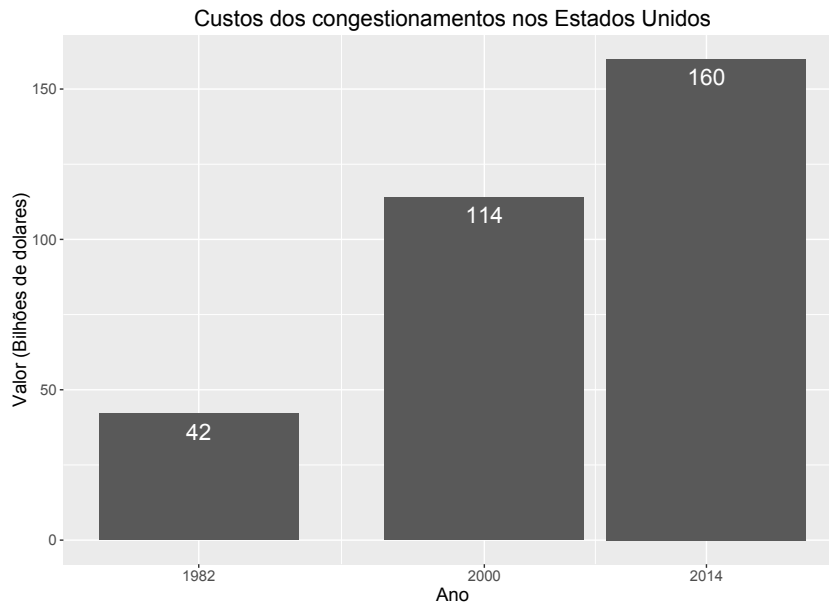


Figura 4 – Custo dos congestionamentos nos Estados Unidos.

bilhões de dólares. A Tabela 1 sumariza os resultados obtidos para cada país.

País	2013	2020	2025	2030
UK	20,53	25,43	29,19	33,4
França	22,51	25,45	27,5	29,59
Alemanha	33,48	37,34	40,45	43,84
EUA	124,16	151,26	169,7	186,22

Tabela 1 – Custos dos congestionamentos, em bilhões de dólares.

Ainda com relação ao relatório divulgado em (CEBR, 2014), os custos acumulados no período de 2013 até 2030, nos quatro países estudados, devem ficar acima de 4,4 trilhões de dólares. O estudo também examina o impacto dos congestionamentos no meio ambiente. As estimativas indicam que os engarrafamentos ocasionam a emissão de 15.434 kilotons de CO_2 anualmente e é previsto um aumento de 16% neste valor até o ano de 2030. As estimativas monetárias dos custos sociais relacionados aos impactos ambientais são apresentados na Tabela 2.

País	2013	2030
UK	14,5	286,3
França	13,9	308,4
Alemanha	21,8	429,9
EUA	300,2	538,2

Tabela 2 – Estimativas monetárias dos custos sociais referentes à emissão adicional de CO_2 por conta dos congestionamentos, em milhões de dólares.

Os relatórios apresentados concluem que medidas políticas devem ser tomadas pelos governos para melhorar a situação dos congestionamentos e minimizar os seus custos. Algumas das formas para mitigar este problema são:

- Melhorias na infraestrutura do transporte público e o incentivo ao uso deste tipo de transporte.
- Esquemas como o *carpooling*, que têm como objetivo permitir o compartilhamento de um automóvel particular por duas ou mais pessoas para viajar juntas durante horários de pico.
- Melhorias na infraestrutura das rodovias de modo que possam acomodar mais veículos simultaneamente.
- Uso de Sistemas Inteligentes de Transportes, que permitem, por exemplo, sugestões de melhores rotas a serem seguidas pelos motoristas e controle adaptativo de sinais de trânsito.

É neste contexto que se encontra o objetivo deste trabalho. Pretende-se, por meio dos Sistemas Inteligentes de Transportes, propor uma nova solução distribuída para sugestão das melhores rotas a serem seguidas pelos motoristas. A tecnologia de redes veiculares é utilizada para permitir que os veículos troquem informações sobre as condições de tráfego das vias e, baseados nestas informações, estimarem as melhores rotas. Na próxima seção é apresentada uma revisão dos trabalhos encontrados na literatura que propõem soluções para a redução de congestionamentos por meio das redes veiculares.

3.2 Classificação das Soluções que utilizam Redes Veiculares para Redução de Congestionamentos

Um número significativo de soluções para controle de congestionamentos veiculares baseadas na comunicação sem fio entre veículos vêm sendo propostas (GERALDO; CAMPISTA; COSTA, 2013) (GRAMAGLIA; CALDERON; BERNARDOS, 2014) (AISSAOUI et al., 2014) (MILOJEVIC; RAKOCEVIC, 2014) (YOUNES; BOUKERCHE, 2013) (XU et al., 2014) (ARAÚJO et al., 2014) (BELLAVISTA; FOSCHINI; ZAMAGNI, 2014) (GUPTE; YOUNIS, 2012) (WISCHOFF et al., 2003) (GARIP et al., 2015). De maneira geral, tais soluções têm algumas das seguintes características: estimativa dos níveis de congestionamento, divulgação de informações das condições de tráfego, minimização, predição e prevenção de congestionamentos.

A maioria dos trabalhos encontrados possui a necessidade da instalação de unidades de acostamento (RSU). Conforme discutido anteriormente, a instalação e manutenção de infraestruturas necessárias para cobrir completamente determinada área urbana pode apresentar altos custos (GARIP et al., 2015), o que representa uma desvantagem para as soluções que dependem da existência das RSUs. Os seguintes trabalhos apresentam essa limitação: (GERALDO; CAMPISTA; COSTA, 2013), (AISSAOUI et al., 2014), (YOUNES;

BOUKERCHE, 2013), (XU et al., 2014), (ARAÚJO et al., 2014) (exigido para transmitir as informações para veículos em outras vias), (BELLAVISTA; FOSCHINI; ZAMAGNI, 2014).

A Tabela 3 sumariza os trabalhos encontrados e os classifica de acordo com as seguintes características:

- **Quantificação (Quant.):** Técnicas que estimam os níveis de congestionamentos nas diversas vias.
- **Disseminação (Disse.):** Técnicas que disseminam as informações de níveis de congestionamentos para veículos em outras vias.
- **Arquitetura (Arqui.):** Especifica qual tipo de comunicação é utilizada na proposta. As opções são: V2V (veículo para veículo), V2I (veículo para infraestrutura) e V2X (veículo para veículo e veículo para infraestrutura).
- **Alteração de rotas (Alter.):** Técnicas que utilizam as informações geradas sobre congestionamentos de trânsito para calcular as melhores rotas e assim diminuir o tempo médio de viagem dos veículos.

Trabalho	Quant.	Disse.	Arqui.	Alter.
DTraMS (GERALDO; CAMPISTA; COSTA, 2013)	Sim	Sim	V2X	Não
ABEONA (GRAMAGLIA; CALDERON; BERNARDOS, 2014)	Sim	Não	V2V	Não
(AISSAOUI et al., 2014)	Sim	Não	V2X	Não
(MILOJEVIC; RAKOCEVIC, 2014)	Sim	Sim	V2V	Não
ECODE (YOUNES; BOUKERCHE, 2013)	Sim	Não	V2X	Sim
(XU et al., 2014)*	Não	Não	V2I	Sim
CARTIM (ARAÚJO et al., 2014)	Sim	Sim**	V2X	Sim
(BELLAVISTA; FOSCHINI; ZAMAGNI, 2014)	Sim	Não	V2X	Não
(GUPTE; YOUNIS, 2012)	Não	Não	V2V	Sim
SOTIS (WISCHOFF et al., 2003)	Sim	Sim	V2V	Não
(GARIP et al., 2015)	Não	Não	V2V	Sim

* Necessita que os carros estejam sempre conectados a um servidor central

** A disseminação para outras vias ocorre com a utilização da comunicação V2I

Tabela 3 – Classificação dos trabalhos relacionados

3.3 Principais Soluções para Redução de Congestionamentos

Esta seção apresenta um resumo sobre os principais trabalhos exibidos na seção 3.2. Os trabalhos descritos são: (i) (GRAMAGLIA; CALDERON; BERNARDOS, 2014), (ii) (MILOJEVIC; RAKOCEVIC, 2014), (iii) (ARAÚJO et al., 2014), (iv) (GUPTE; YOUNIS, 2012) e (v) (GARIP et al., 2015).

3.3.1 ABEONA Monitored Traffic: VANET-Assisted Cooperative Traffic Congestion Forecasting

Um sistema para monitoramento de tráfego chamado ABEONA é apresentado em (GRAMAGLIA; CALDERON; BERNARDOS, 2014). Os objetivos deste sistema são: 1) Estimar o fluxo e a densidade de veículos da via onde o veículo está e 2) Prever a transição do estado do tráfego em uma via de **Tráfego Livre** para **Tráfego Sincronizado**.

Tráfego Livre é definido como “o estado onde a densidade veicular é razoavelmente baixa e motoristas podem facilmente manter a velocidade desejada e ultrapassar veículos mais lentos”. Já **Tráfego Sincronizado** é definido como “o estado em que a densidade veicular é de tal modo que a ultrapassagem não é fácil e a velocidade média dos veículos em cada faixa diminui de forma acentuada e sincronizada”. Assim, o comportamento dos motoristas em uma via com tráfego sincronizado é influenciado pelos outros motoristas.

O cálculo da estimativa da densidade e do fluxo de veículos é feito por cada veículo utilizando os *beacons* recebidos de seus vizinhos (veículos dentro do raio de comunicação do rádio). *Beacon* pode ser definido com um tipo especial de pacote transmitido periodicamente por todos os veículos para informar aos vizinhos sobre a sua existência. Nas redes veiculares os *beacons* também podem transmitir outras informações sobre o veículo, tais como sua velocidade atual, posição, aceleração, direção, etc. Neste trabalho relacionado, cada veículo agrupa os dados monitorados em conjuntos de 1 minuto identificados por um identificador da época atual (*EpochId*).

Para realizar a estimativa de densidade, inicialmente cada veículo constrói um mapa atualizado com as posições dos veículos vizinhos. A estimativa é então inferida dividindo a distância entre o par de vizinhos que estão mais distantes um do outro pela quantidade de vizinhos. Este cálculo está ilustrado na Figura 5.

A estimativa de fluxo utiliza um conceito chamado de laço de indução virtual (*Virtual Induction Loop* - VIL), que é uma linha virtual de referência que cruza a via. Existe apenas um VIL por segmento de via. A posição de cada VIL é incluída nos mapas digitais utilizados pelos sistemas de navegação dos veículos. Cada veículo mantém uma tabela VIL com a lista de veículos que atravessaram a linha de referência VIL na época atual (intervalo de 1 minuto). Sempre que um veículo atravessa uma linha de referência VIL, esta informação é inserida na sua tabela VIL. As informações contidas nas tabelas VILs são incluídas nos *beacons* de cada veículo, assim os vizinhos podem adicionar estes valores nas suas respectivas tabelas. Para limitar o tamanho dos *beacons*, apenas um pequeno conjunto aleatório de linhas da tabela VIL é adicionado aos *beacons*. Por meio da tabela VIL é possível verificar quantos veículos atravessaram a via na época atual.

No ABEONA cada veículo mantém uma tabela com o histórico de densidade e fluxo dos últimos 20 minutos. Com o histórico e com um conjunto de valores de referência

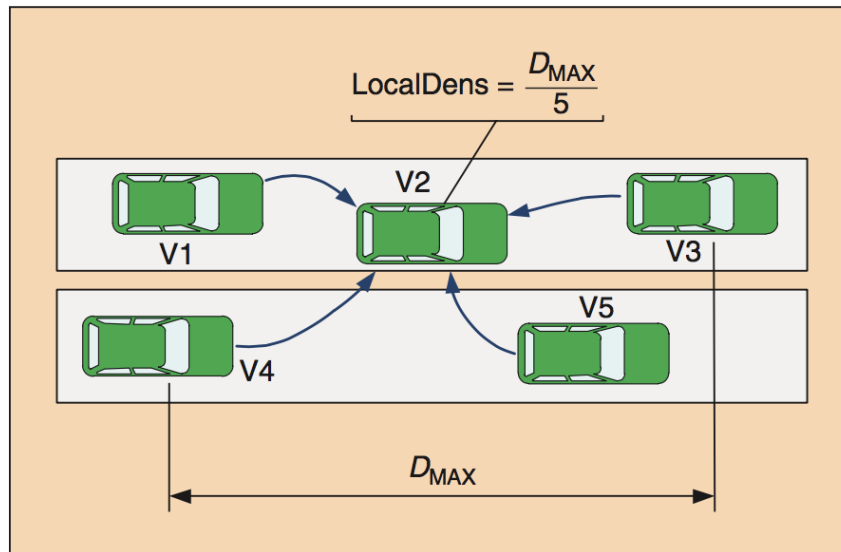


Figura 5 – ABEONA: Estimativa local de densidade. Figura retirada de (GRAMAGLIA; CALDERON; BERNARDOS, 2014).

(inseridos previamente no sistema de navegação dos veículos) um veículo pode prever os valores futuros de densidade e fluxo utilizando um algoritmo de predição linear (Linear dos Mínimos Quadrados (GEER, 2014)). Quando os valores previstos forem maiores que os valores de referência é então detectada uma alteração nas condições de tráfego, de tráfego livre para tráfego sincronizado.

A avaliação do sistema foi realizada pelos autores por meio de simulações. Os valores de fluxo e densidade estimados foram comparados com dados disponibilizados pela prefeitura de Madrid. Estes dados foram utilizados também como “valores de referência” das vias no algoritmo para detectar a mudança de estado do tráfego. O trabalho não trata sobre como os valores coletados são divulgados para veículos em outras vias e nem sobre como estes valores podem ser utilizados para reduzir os congestionamentos.

3.3.2 Distributed Road Traffic Congestion Quantification Using Cooperative VANETs

Em (MILOJEVIC; RAKOCEVIC, 2014), os autores propõem um algoritmo distribuído para quantificação de congestionamentos de trânsito. Por meio desse algoritmo, cada veículo é capaz de estimar o nível de congestionamento local considerando apenas a velocidade atual. Mediante a troca de mensagens com outros veículos, é possível validar estas informações e obter informações de outras vias.

O nível de congestionamento local de um veículo é calculado analisando o período de tempo em que a sua velocidade se mantém acima ou abaixo de um determinado limiar. A disseminação de informações para veículos em outras vias é feita por intermédio de *broadcasts multi-hop*. *Broadcast multi-hop* é uma forma de transmissão de informações para

diversos veículos utilizando vários saltos. Assim uma mensagem pode alcançar veículos que estão mais distantes do que o atual alcance do raio de comunicação do veículo transmissor. Um dos problemas ocasionados pelo *broadcast multi-hop* é a sobrecarga do meio sem fio. Para evitar este problema, os autores propõem um esquema de *broadcast* adaptativo, no qual o intervalo de *broadcast* (tempo entre duas transmissões consecutivas) é influenciado pelo nível de congestionamento local calculado pelo veículo. Na proposta, um veículo só irá transmitir a sua estimativa de nível de congestionamento em *broadcast multi-hop* quando a sua estimativa for maior do que a média das estimativas recebidas de outros veículos para a via atual.

O algoritmo foi feito buscando atingir os seguintes objetivos: 1) eficiência em termos de mensagens trocadas, 2) completamente distribuído e 3) independente de qualquer tipo de infraestrutura ou sistemas externos. Os veículos precisam também obter informações sobre os níveis de congestionamentos de outras vias, mesmo aquelas nas quais o veículo não irá passar.

Os autores não avaliam o impacto da sinalização sobre o congestionamento na eficiência do deslocamento dos veículos, o que deveria reduzir os níveis de congestionamentos ou evitar que os veículos alcancem áreas congestionadas. O trabalho desenvolvido limita-se a apenas detectar e disseminar as informações de congestionamentos.

3.3.3 Um Protocolo de Identificação e Minimização de Congestionamentos de Tráfego para Redes Veiculares

Um protocolo para detecção e redução de congestionamentos em redes veiculares, chamado CARTIM, é proposto em (ARAÚJO et al., 2014). A proposta utiliza um sistema baseado em lógica *fuzzy* que possui como variáveis de entrada a velocidade do veículo e a densidade veicular da via. A Figura 6 mostra as funções de pertinência para os conjuntos *fuzzy* de entrada do sistema, bem como o conjunto *fuzzy* de saída. Por meio dessas informações o nível de congestionamento local é estimado. A validação das estimativas de níveis de congestionamento são feitas com a troca de mensagens entre os veículos que estão presentes na via. Esse processo de validação é realizado com encaminhamento de mensagens *multi-hop* e *unicast*, partindo da extremidade dianteira do congestionamento para a extremidade traseira. Em um processo de encaminhamento de mensagens *unicast* apenas um veículo é escolhido para a retransmissão da mensagem a cada salto.

Ainda em (ARAÚJO et al., 2014) os autores propõem uma heurística para minimização dos congestionamentos de tráfego. Assim que o nível de congestionamento atingir um determinado limiar, os veículos passam a transmitir mensagens CTA (*Congestion Traffic Avoid*) sinalizando para outros veículos que eles devem evitar passar na via sob condições severas. A comunicação V2I é utilizada para que as mensagens CTA sejam transmitidas

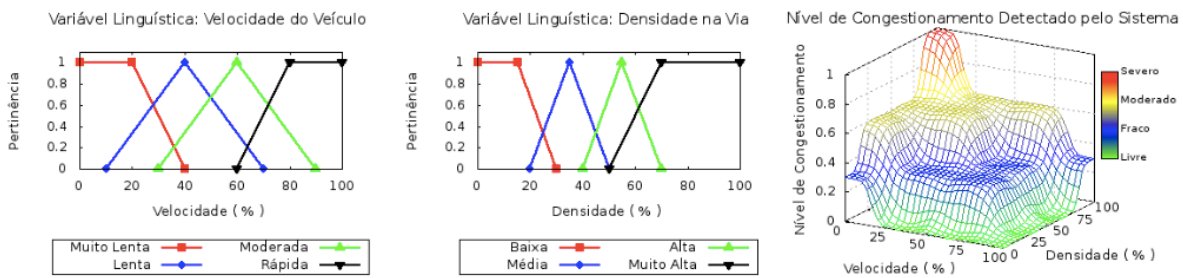


Figura 6 – Funções de pertinência para os conjuntos fuzzy e conjunto de saída utilizados no CARTIM. Retirado de (ARAÚJO et al., 2014)

para veículos em outras vias. Tal característica pode representar uma limitação com relação ao desempenho do protocolo em cenários V2V.

3.3.4 Vehicular Networking for Intelligent and Autonomous Traffic Management

Em (GUPTE; YOUNIS, 2012) é proposto um algoritmo com o objetivo de balancear as cargas nas vias e prevenir congestionamentos. Neste algoritmo, cada veículo escolhe uma rota inicial e um conjunto de rotas opcionais. Cada veículo obtém informações de quantos veículos possuem rotas com arestas semelhantes à sua rota atual por meio da troca de mensagens (*Query Messages* e *Reply Messages*) com veículos em um determinado raio de comunicação. Baseando-se nessas informações o sistema poderá sugerir uma das rotas opcionais como a melhor rota a ser seguida.

A Figura 7 apresenta os principais parâmetros utilizados por cada veículo na proposta. D_R representa o raio de comunicação, R_C a rota atual e $R_O[i]$ o conjunto de rotas opcionais.

A proposta foi avaliada por meio de simulações e comparada com outros dois mecanismos de gerenciamento de tráfego. O primeiro mecanismo é um sistema ideal em que todos os veículos possuem conhecimentos sobre as condições de trânsito de todas as vias. Com isso as melhores rotas são sempre escolhidas. No outro sistema comparado, chamado de *Autonomos*, os veículos que estão entrando em zonas congestionadas são alertados para evitar o aumento de congestionamentos. As métricas avaliadas foram a redução no tempo de viagem e o *overhead* de sinalização. Um ponto negativo na avaliação da proposta foi que o cenário de simulação utilizado foi um ideal em que todas as mensagens enviadas são recebidas, ou seja, não existe perda de pacotes.

3.3.5 Scalable Reactive Vehicle-to-Vehicle Congestion Avoidance Mechanism

É proposto em (GARIP et al., 2015) um mecanismo eficiente e escalável de prevenção de congestionamentos utilizando a comunicação V2V das redes veiculares. Ao contrário da

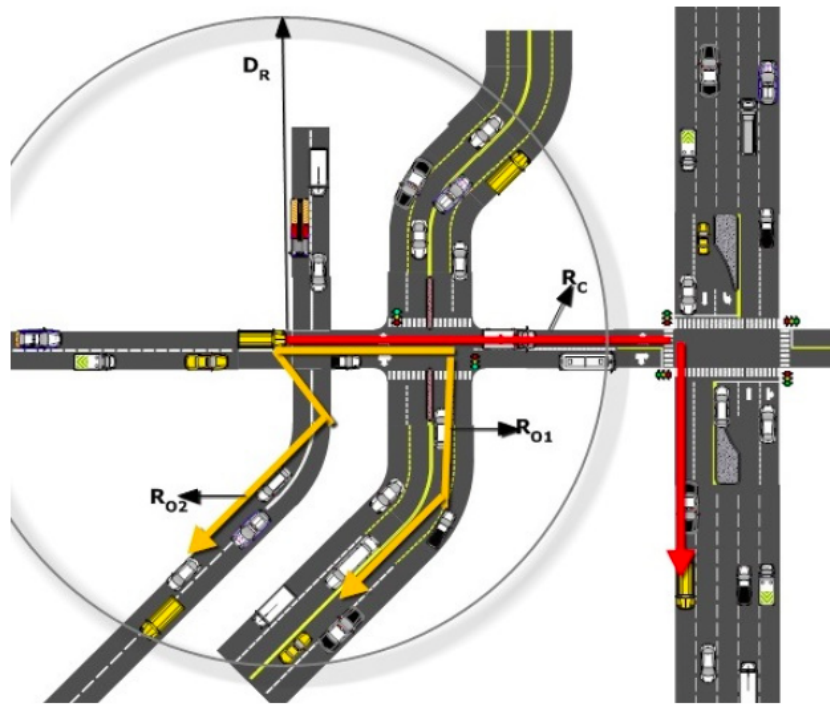


Figura 7 – Ilustração dos parâmetros veiculares utilizados no trabalho de (GUPTE; YOUNIS, 2012). Figura retirada de (GUPTE; YOUNIS, 2012).

maioria das soluções, é necessário o conhecimento apenas das condições de um subconjunto das vias do mapa, e não um conhecimento global.

O roteamento de cada veículo é feito da seguinte forma. Inicialmente é calculado o menor caminho por meio do algoritmo de Dijkstra (DIJKSTRA, 1959) entre o ponto de origem e destino do veículo. São inseridos *checkpoints* no caminho calculado anteriormente. Sempre que um veículo se aproxima de um *checkpoint* é escolhido a melhor rota até o próximo *checkpoint* dentro de um conjunto de rotas alternativas. A escolha da melhor rota até o próximo *checkpoint* é feita utilizando informações recebidas de outros veículos.

Para o funcionamento do mecanismo são necessários o uso de três tipos de mensagens: 1) *beacons*, 2) *congestion request messages* e 3) *congestion response messages*. Os *beacons* são utilizados para uma estimativa da velocidade média dos veículos que estão na mesma via. As *congestion request messages* contêm uma lista de vias de interesse. São transmitidas quando o veículo se aproxima de um *checkpoint* e precisa escolher entre duas ou mais rotas alternativas para alcançar o próximo *checkpoint*. Será selecionada uma rota alternativa de acordo com as mensagens recebidas em resposta à *congestion request message*. A Figura 8 demonstra um cenário onde o veículo precisa escolher entre as rotas R_1 , R_2 e R_3 para chegar ao seu destino. As flechas representam as vias de interesse. Assim, a *congestion request message* irá conter os identificadores das vias presentes nas três rotas. Já as *congestion response messages* são enviadas em resposta às *congestion request messages*. As *congestion response messages* são compostas pelas informações de

congestionamento referentes às vias de interesse da requisição e que estão no banco de dados do veículo que recebeu a requisição.

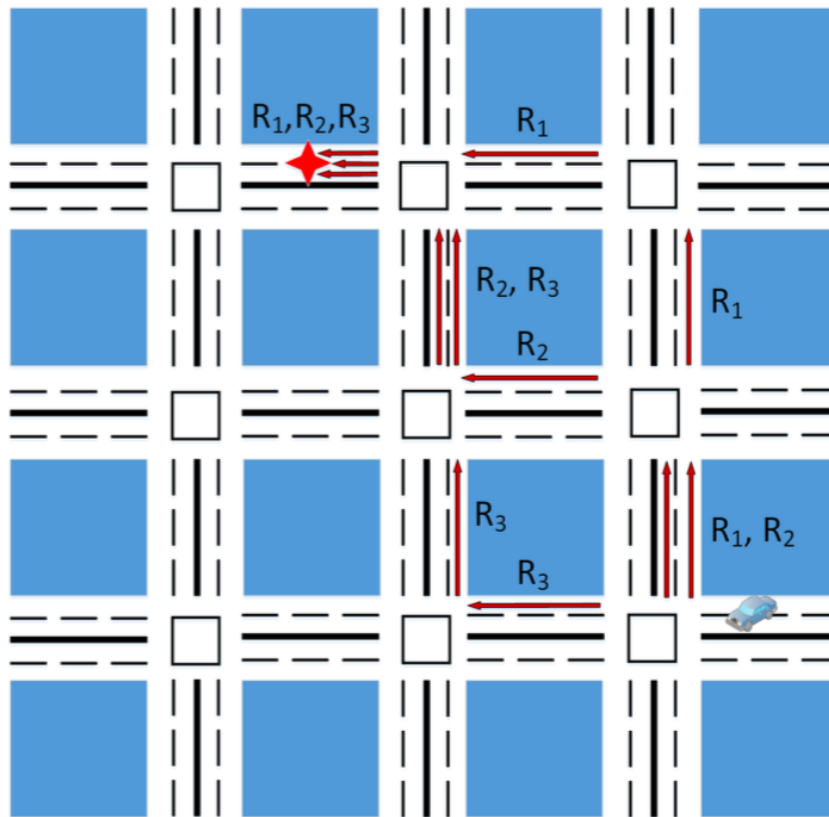


Figura 8 – Uma decisão de rota com três rotas alternativas. Figura retirada de (GARIP et al., 2015).

A avaliação da proposta foi realizada por meio de simulações. Foi verificada a redução do tempo médio de viagem dos veículos quando comparado com um cenário onde os veículos seguem apenas a rota calculada inicialmente pelo algoritmo de menor caminho. Verificou-se que quanto maior o volume do tráfego das vias, maior será a redução do tempo médio de viagem dos veículos.

3.4 Considerações Finais

Com o levantamento realizado pode-se observar uma grande quantidade de trabalhos publicados nos últimos anos que utilizam as redes veiculares para o monitoramento de tráfego ou controle de congestionamentos (GERALDO; CAMPISTA; COSTA, 2013) (GRAMAGLIA; CALDERON; BERNARDOS, 2014) (AISSAOUI et al., 2014) (MILOJEVIC; RAKOCEVIC, 2014) (YOUNES; BOUKERCHE, 2013) (XU et al., 2014) (ARAÚJO et al., 2014) (BELLAVISTA; FOSCHINI; ZAMAGNI, 2014) (GUPTE; YOUNIS, 2012) (GARIP et al., 2015).

Apenas alguns destes trabalhos propõem formas para diminuir os congestionamentos escolhendo as melhores rotas para os veículos, como apresentado na Tabela 3. Ao restringir a arquitetura utilizada à V2V essa lista fica ainda menor. Ressalta-se que esta restrição se faz devido aos altos custos necessários para a instalação e manutenção das infraestruturas utilizadas na comunicação V2I. Assim, observa-se que são poucos os trabalhos que possuem todas as características consideradas nesta pesquisa.

No Capítulo 4 é apresentado um protocolo de baixo *overhead* proposto no âmbito deste trabalho de mestrado e publicado em (SOUSA; SOARES, 2015). O referido protocolo possui todas as características listadas, que são: detecção e quantificação de congestionamentos, disseminação de informações, utilização da arquitetura V2V e minimização de congestionamentos. O objetivo final do protocolo é reduzir o tempo médio de viagem dos veículos apresentando um baixo *overhead* de sinalização.

4 Protocolo de Baixo *Overhead* para Redução de Congestionamentos em Redes Veiculares

Neste capítulo é apresentado um protocolo para redução de congestionamentos com baixo *overhead* e um estudo de avaliação de desempenho. O protocolo proposto faz uso de três mecanismos: (i) detecção e quantificação de congestionamento, (ii) disseminação de informação e (iii) minimização de congestionamento. Ressalta-se que o mecanismo de detecção e quantificação de congestionamento utilizado é baseado no protocolo apresentado em (MILOJEVIC; RAKOCEVIC, 2014).

4.1 Detecção e Quantificação de Congestionamento

Uma das definições de congestionamento de trânsito mais utilizadas na literatura é a apresentada em (LOMAX; BOARD; INSTITUTE, 1997). Os autores em (LOMAX; BOARD; INSTITUTE, 1997) definem o congestionamento de trânsito como um tempo de viagem ou atraso superior ao que é necessário para realizar o mesmo deslocamento em condições de baixo fluxo de veículos. Em (RAO; RAO, 2012) os autores apresentam diferentes métricas para identificar e medir o congestionamento veicular urbano. Os autores concluem que congestionamento é uma função da redução nas velocidades dos veículos. Os autores em (RAO; RAO, 2012) também apontam a utilidade de medir o congestionamento relacionando a velocidade dos veículos a um limiar de velocidade apropriado para uma dada via de trânsito. Vale ressaltar que o conceito de via utilizado neste trabalho se refere a um trecho de rua ou avenida delimitado por dois cruzamentos. A Figura 9 auxilia na compreensão deste conceito.

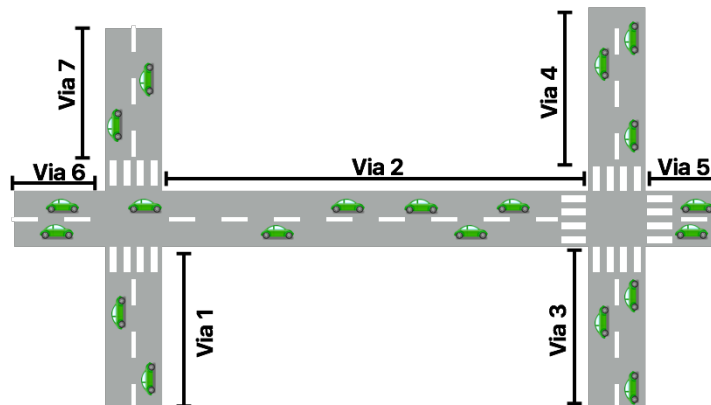


Figura 9 – Definição de vias.

De acordo com (RAO; RAO, 2012), neste contexto, a velocidade atual de cada veículo (V_c) é utilizada como parâmetro para quantificar o nível de congestionamento. Assume-se que cada via de trânsito tem um Limiar de Velocidade (V_t) de referência para quantificar o nível de congestionamento da própria via. Neste trabalho de mestrado o valor de V_t utilizado foi de um terço da velocidade máxima permitida em cada via. Dessa forma, cada veículo calcula um Nível de Congestionamento Local C_L analisando o período de tempo em que a sua velocidade se mantém acima ou abaixo de V_t . C_L pode assumir valores discretos de um a dez. O valor inicial de C_L é 1, o que representa fluxo livre. Os valores maiores que 1 são reservados para situações nos quais a velocidade é menor que o limiar V_t . O Algoritmo 1 é utilizado para atualizar o valor de C_L . Neste algoritmo, a função *min* é responsável por limitar a 10 o valor máximo do novo nível de congestionamento calculado. Ela recebe dois números inteiros, neste caso o número 10 e o valor calculado como novo nível de congestionamento, e retorna o menor deles.

Entrada:

T : Tempo desde a última vez que a velocidade instantânea do veículo se tornou maior ou menor que o limiar V_t

V_c : Velocidade atual do veículo

V_t : Limiar de velocidade de referência

C_L : Nível de congestionamento atual.

início

```

| se  $V_c > V_t$  e  $T > 10s$  então
|   |  $C_L = 1$ ;
|   fim
| se  $V_c \leq V_t$  então
|   |  $C_L = \min(10, \lfloor \frac{T+19}{20} \rfloor)$ ;
|   fim
fin

```

Algoritmo 1: Algoritmo que altera o valor de C_L .

A variável T refere-se ao período de tempo em que a velocidade do veículo (V_c) se mantém acima ou abaixo do V_t . A cada intervalo de tempo Int_c em que V_c se mantém abaixo do limiar V_t , o valor de C_L é incrementado em uma unidade. O valor de Int_c utilizado neste trabalho foi de 20 segundos. Neste caso, se V_c for mantida abaixo de V_t por mais de 200 segundos o congestionamento será máximo ($C_L = 10$). Se V_c for mantida acima de V_t por um intervalo de tempo Int_{nc} , o valor de C_L será igual a 1, independente do seu valor anterior. O valor de Int_{nc} utilizado neste trabalho foi de 10 segundos.

A Figura 10 exemplifica a estimativa de congestionamento de um veículo calculada a partir de sua velocidade instantânea V_c . O gráfico da Figura 10 foi gerado por meio de uma simulação considerando os aspectos adotados neste trabalho. *Nível de Congestionamento* e *Velocidade* representam as curvas da estimativa de congestionamento e da velocidade instantânea do veículo, respectivamente.

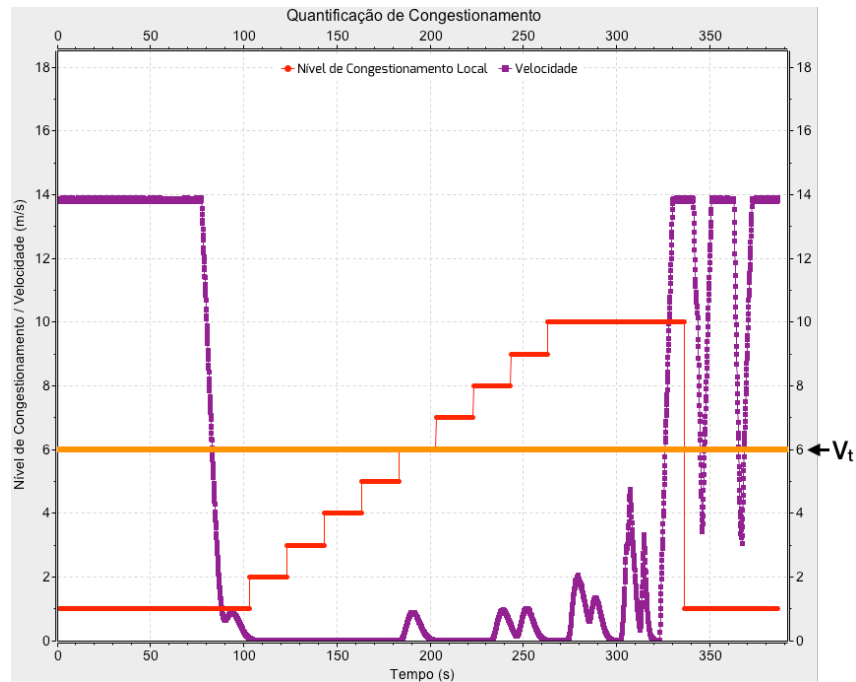


Figura 10 – Resultados da quantificação do congestionamento de um veículo e sua velocidade.

Ainda na Figura 10 observa-se as curvas de velocidade e estimativa de congestionamento instantâneos. Durante os 80 segundos iniciais a velocidade do veículo analisado se mantém acima de V_t ($6m/s$). Dessa forma, estima-se que a via tem fluxo livre, $C_L = 1$. A partir dos 80 segundos, V_c passa a diminuir com o tempo. Observa-se que, a cada 20 segundos, C_L é incrementado em uma unidade porque a velocidade do veículo se mantém abaixo de V_t . Em 260 segundos o nível de congestionamento é máximo, $C_L = 10$. A partir dos 340 segundos, V_c aumenta rapidamente, o que significa que o veículo saiu de um trecho congestionado da via. Note que após 10 segundos, com $V_c > V_t$, a estimativa do congestionamento atinge o valor mínimo, $C_L = 1$.

4.2 Disseminação de Informação

Um dos objetivos do monitoramento de tráfego é proporcionar que os veículos cientes das condições de trânsito utilizem um trajeto menos congestionado para deslocamento. Assim, é importante fazer o uso de um mecanismo para o compartilhamento das estimativas de congestionamento entre os veículos. O compartilhamento de informações também é útil para a validação das informações coletadas.

Nesta proposta os veículos transmitem suas estimativas de congestionamento para seus vizinhos com o uso de *beacons*. São transmitidas as estimativas de congestionamento calculadas da via atual e da via percorrida anteriormente. Assim, as seguintes informações são inseridas nos *beacons*: (i) identificador da via atual, (ii) identificador da via percorrida

anteriormente, (iii) estimativa de congestionamento da via atual e (iv) estimativa de congestionamento da via percorrida anteriormente. Esse conjunto de informações para um dado veículo é chamado neste trabalho de Estimativa Local de Congestionamento (*ELC*).

Vale ressaltar que as informações dos *beacons* desta proposta podem ser inseridos nas *Cooperative Awareness Messages* (CAMs). As CAMs são definidas pelo *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI) para a disseminação de dados de interesse local. Assim a transmissão dos dados dos *beacons* não elevaria o *overhead* de sinalização. Esta abordagem também é utilizada em outros trabalhos, como em (GRAMAGLIA; CALDERON; BERNARDOS, 2014).

Com o objetivo de disseminar as informações para veículos que estão fora do raio de comunicação e sem ocasionar em uma sobrecarga no meio sem fio, a disseminação das estimativas de congestionamento também é realizada com o uso de *clusters*. Essa abordagem é utilizada em (AISSAOUI et al., 2014). A área de cada *cluster* é uma região fixa referente a um segmento de via de comprimento igual ao raio de comunicação dos veículos. A Figura 11 ilustra a definição de *clusters*.

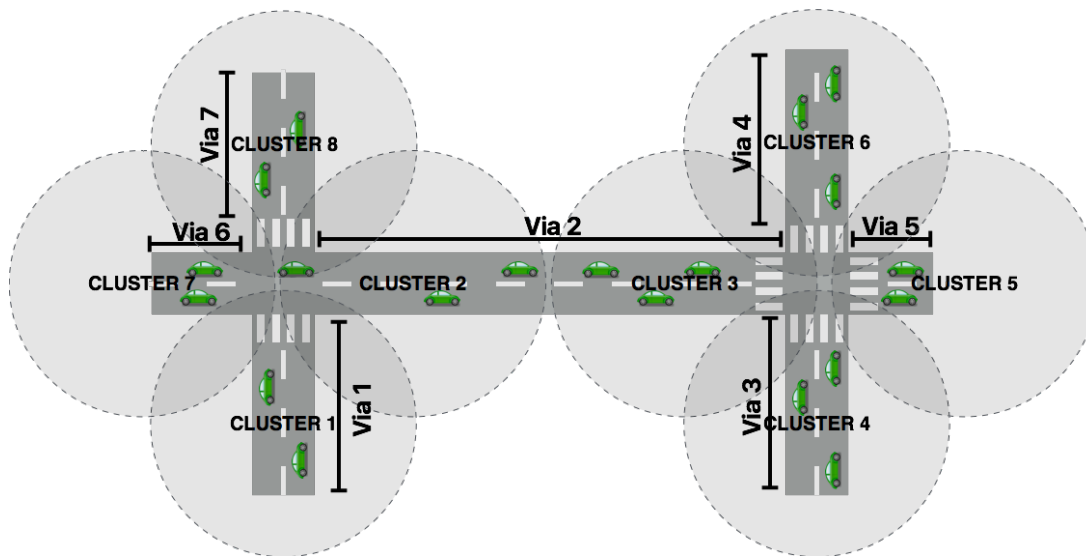


Figura 11 – Definição de *clusters*.

A Figura 12 exemplifica o processo de escolha do *cluster-head*. Assume-se que cada veículo possui um mapa digital com uma lista dos centros de todos os *clusters* da cidade. Cada veículo mantém as informações de posições de seus vizinhos. Essas informações são coletadas dos *beacons* detectados nos últimos cinco segundos (GRAMAGLIA; CALDERON; BERNARDOS, 2014). Para cada *cluster* um único veículo (*cluster-head*) é escolhido para transmitir em *broadcast* as informações coletadas de seus vizinhos. Na Figura 12 o veículo azul é escolhido para ser o *cluster-head* por estar mais próximo do centro do *cluster*. O *cluster-head* agrega as informações dos veículos pertencentes ao seu *cluster*. As estimativas de congestionamento enviadas pelo *cluster-head* são transmitidas em *multi-hop* para alcançar os veículos fora do *cluster* emissor.

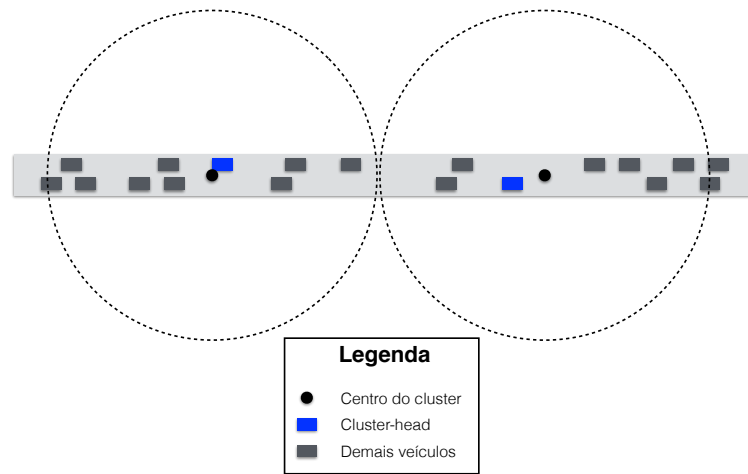


Figura 12 – Escolha do *cluster-head* para disseminação do *ELC*.

Cada veículo mantém uma tabela com as estimativas de congestionamentos das diversas vias da região. Essa tabela é preenchida com as estimativas de congestionamento do próprio veículo e com as estimativas recebidas de outros veículos. Destaca-se que cada veículo recebe estimativas de congestionamento dos seus vizinhos, por meio dos *beacons*, e de veículos de outros *clusters*. A tabela com as estimativas de congestionamentos é atualizada sempre que um veículo recebe novas estimativas. A atualização da tabela segue uma média simples entre a estimativa atual e a nova estimativa recebida.

Conforme mencionado anteriormente, cada veículo calcula uma nova estimativa de congestionamento com a mudança de sua velocidade. Se essa nova estimativa for maior ou igual a estimativa de sua própria via armazenada em sua tabela de congestionamento, os seguintes passos são realizados para decidir sobre o envio da mensagem em *broad multi-hop* para os demais veículos com as novas estimativas. Primeiro verifica-se a qual *cluster* o veículo em questão pertence. Para isso verifica-se qual é o *cluster* com o centro mais próximo da posição atual do veículo. A mensagem somente será enviada se o veículo for o mais próximo do centro do seu *cluster* (neste caso o veículo em questão é o *cluster-head*). Vale lembrar que o posicionamento dos vizinhos é identificado com a leitura dos seus *beacons*. A mensagem enviada pelo *cluster-head* contém a *ELC* do próprio *cluster-head* e a *ELC* de seus vizinhos. Para isso, cada veículo reúne as *ELCs* de até dez vizinhos recebidos nos últimos cinco segundos. A quantidade de *ELCs* em uma mesma mensagem é restringida a um máximo de dez para limitar o tamanho das mensagens.

Cada veículo mantém uma tabela com informações de estimativas de congestionamento de diversas vias. Essa tabela é montada utilizando as informações das mensagens recebidas de outros veículos. A Figura 13 apresenta uma comparação entre a estimativa

local de congestionamento (*Nível de Congestionamento Local*) de um determinado veículo e o valor salvo na tabela (*Nível de Congestionamento no Banco de Dados*), para uma mesma via. Observa-se que, mesmo antes do veículo estimar um aumento no nível de congestionamento (após os 100 segundos), as informações presentes na tabela já indicam um aumento no nível de congestionamento. É importante notar que as estimativas do veículo e as estimativas presentes na tabela se mantêm compatíveis no decorrer da simulação.

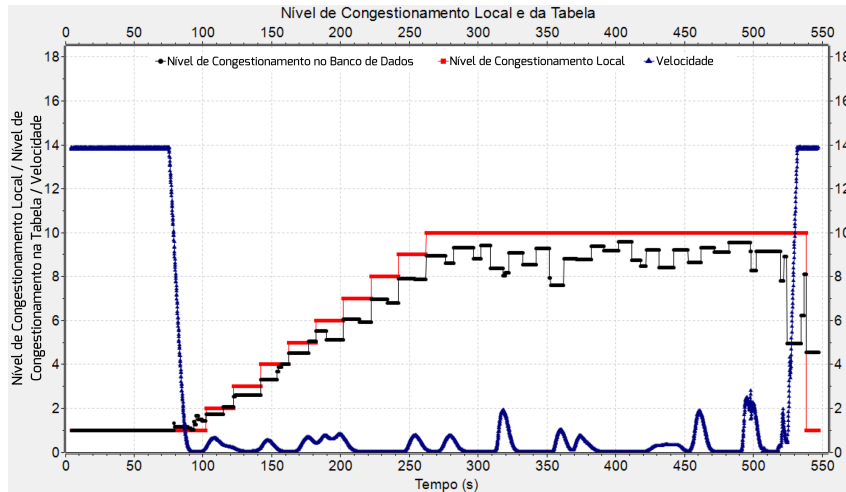


Figura 13 – Nível de congestionamento que o veículo calculou localmente por meio de sua velocidade e o nível de congestionamento recebido de outros veículos para a via atual.

A Figura 14 apresenta um resumo das etapas necessárias para decidir se um veículo deve ou não transmitir as estimativas de congestionamento por meio do *broadcast* de múltiplos saltos.



Figura 14 – Etapas para decidir se o veículo deve transmitir as informações em *broadcast* de múltiplos saltos.

Inicialmente o veículo deve detectar uma mudança no nível de congestionamento local. Após isso, verifica-se se esse novo nível de congestionamento detectado é maior que o valor da via atual presente na tabela de congestionamento. Por último, o veículo verifica se ele é o atual *cluster-head* do seu *cluster*. Somente após realizar essas três verificações o veículo irá transmitir a mensagem em *broadcast* de múltiplos saltos.

4.3 Minimização de Congestionamento

Com o objetivo de reduzir o tempo desperdiçado no trânsito pelos motoristas, foi proposta a utilização da tabela que cada veículo possui com as estimativas de congestionamentos das diversas vias da região para o cálculo das rotas. O cálculo da nova rota é feito sempre que uma alteração na tabela for detectada. Inicialmente é atribuído um peso para cada via por meio da Equação 4.1, na qual P é o peso atribuído para a via, T é o tamanho da via em metros, V_{id} é a velocidade máxima permitida para a via e C_L é o nível de congestionamento da via salvo na tabela.

$$P = \frac{T}{V_{id}} \times C_L \quad (4.1)$$

Calculados os pesos de todas as vias, o veículo então recalcula a sua rota por meio do algoritmo de menor caminho de Dijkstra (DIJKSTRA, 1959).

4.4 Avaliação de Desempenho

O estudo de avaliação de desempenho visa comparar a nova solução proposta no âmbito deste trabalho de mestrado com os trabalhos identificados no capítulo anterior que possuem as seguintes características: 1) **arquitetura V2V** e 2) **alteração de rotas**. Os trabalhos que já tiveram o desempenho superado por outras propostas não foram avaliados. Um dos mecanismos da solução proposta neste trabalho foi inspirado no algoritmo apresentado em (MILOJEVIC; RAKOCEVIC, 2014). Por esse motivo a solução de (MILOJEVIC; RAKOCEVIC, 2014) foi incluída na avaliação de desempenho. Assim, os seguintes trabalhos foram selecionados para o estudo de avaliação de desempenho: (MILOJEVIC; RAKOCEVIC, 2014), (GUPTE; YOUNIS, 2012), (GARIP et al., 2015). O estudo foi realizado por meio de simulações computacionais e as principais métricas avaliadas foram o *overhead* de sinalização e a redução no tempo médio de viagem dos veículos.

Para este propósito foi utilizada a ferramenta de simulação de rede OMNeT++ 4.6 (VARGA; HORNIG, 2008) em conjunto com o simulador de tráfego e mobilidade urbana SUMO 0.23.0 (KRAJZEWICZ et al., 2012). O *framework* Veins 3.0 (SOMMER; GERMAN; DRESSLER, 2011), que é amplamente utilizado no estudo de redes veiculares

(MILOJEVIC; RAKOCEVIC, 2014), (ARAÚJO et al., 2014), (GRAMAGLIA; CALDERON; BERNARDOS, 2014) e possui suporte para o padrão 802.11p, foi utilizado para integrar estes dois simuladores.

A avaliação foi realizada em dois cenários distintos. O primeiro cenário, chamado de *Manhattan Grid* é apresentado na Seção 4.4.1. Já o segundo cenário, chamado de LuST, corresponde à cidade de Luxemburgo e é apresentado na Seção 4.4.2. A Tabela 4 sumariza os valores utilizados no estudo de avaliação de desempenho para os parâmetros do protocolo proposto.

Parâmetro	Valor
V_t Limiar de velocidade	20 km/h
Int_c Intervalo de tempo para incremento do nível de congestionamento	20 segundos
Int_{nc} Intervalo de tempo para diminuição do nível de congestionamento	10 segundos

Tabela 4 – Valores utilizados no estudo de avaliação de desempenho para os parâmetros do protocolo proposto .

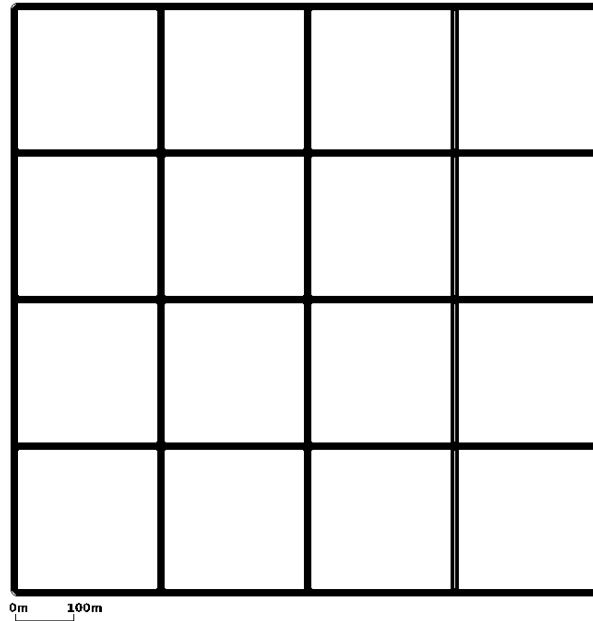
É importante ressaltar que o trabalho de (MILOJEVIC; RAKOCEVIC, 2014) apenas faz a estimativa e disseminação dos níveis de congestionamentos e não propõe uma forma de utilizar essas informações para reduzir o tempo de viagem dos veículos. Por isso, o mecanismo de minimização de congestionamento proposto neste trabalho de mestrado foi incorporado ao trabalho de (MILOJEVIC; RAKOCEVIC, 2014). Isso se fez necessário para incluir o trabalho de (MILOJEVIC; RAKOCEVIC, 2014) no estudo de avaliação de desempenho com relação à redução no tempo de viagem dos veículos.

4.4.1 *Manhattan Grid*

Por meio do simulador de tráfego SUMO foi gerado um cenário do tipo *Manhattan Grid* (5x5) sob uma região de 1 Km². A Figura 15 apresenta o mapa deste cenário de avaliação. Cada segmento de via possui extensão de 250 metros, duas faixas em cada direção e limite de velocidade de 50 km/h. Esse tipo de mapa é comumente utilizado em redes veiculares para avaliar protocolos em ambientes urbanos (MILOJEVIC; RAKOCEVIC, 2014) (ARAÚJO et al., 2014) (GARIP et al., 2015).

Foram geradas 3600 rotas aleatórias de tamanho mínimo de 1 km. Essa quantidade é devida à demanda de tráfego gerada no cenário. As rotas foram criadas escolhendo pares aleatórios de vias origem e destino. Para cada par uma rota foi criada composta pela sequência de vias com o menor caminho que ligam esse par. Em cada simulação, os veículos inicialmente recebem uma dessas rotas aleatórias de menor caminho.

Com o objetivo de verificar a taxa de redução do tempo médio de viagem dos veículos, foram realizadas simulações nas quais os veículos não faziam alterações de rotas.

Figura 15 – Mapa do cenário *Manhattan Grid*.

A duração de cada simulação foi de 1200 segundos. Essa duração foi suficiente para observar a formação de congestionamentos e a capacidade das soluções estudadas em definir rotas melhores para os veículos. Foram implementadas instâncias deste cenário com quatro demandas de tráfego diferentes. Nessas quatro instâncias, a quantidade de veículos foi mantida constante em 150, 200, 250 e 300, respectivamente. Cada instância foi replicada cinco vezes, totalizando 20 replicações.

A potência de transmissão dos veículos foi de 7.1 miliwatts (mW), o que se traduz em um raio de comunicação de cerca de 300 metros. É importante ressaltar que, com o objetivo de potencializar os seus resultados, a potência de transmissão utilizada nas simulações de (GUPTE; YOUNIS, 2012) e (GARIP et al., 2015) foi modificada para 20 mW. Essa potência faz com que o raio de comunicação dos veículos seja de aproximadamente 500 metros. Isso se fez necessário porque estes trabalhos utilizam a transmissão de pacotes por meio de apenas um salabete. Assim, no cenário avaliado, a única forma de um veículo obter informações de veículos que estão afastados é aumentando a potência de transmissão.

Com isso, os gráficos desta seção apresentam os resultados dos seguintes cenários: 1) Sem Roteamento (cenário sem alteração de rotas), 2) *Gupte* (GUPTE; YOUNIS, 2012), 3) Roniel (proposta deste trabalho), 4) *Milojevic* (MILOJEVIC; RAKOCEVIC, 2014) e 5) *Mevlut* (GARIP et al., 2015). Todos os gráficos possuem intervalos com nível de confiança de 95%. A Tabela 5 sumariza os principais parâmetros adotados nas simulações.

4.4.1.1 *Overhead* de Sinalização

O primeiro fator avaliado foi o ***overhead* de sinalização**. A Figura 16 apresenta a quantidade média de pacotes enviados pelos veículos em cada um dos trabalhos avaliados.

Parâmetro	Valor
Duração	1200 segundos
Demanda de tráfego	150, 200, 250 e 300 veículos simultâneos
Potência de transmissão de Roniel e <i>Milojevic</i>	7,1 miliwatts (300 metros de alcance)
Potência de transmissão de <i>Gupte</i> e <i>Mevlut</i>	20 miliwatts (500 metros de alcance)
Frequência de transmissão de <i>beacons</i>	1 Hz
Velocidade máxima dos veículos	50 km/h

Tabela 5 – Parâmetros utilizados nas simulações do cenário *Manhattan Grid*.

Vale destacar que estão inclusos nestes valores os *beacons* transmitidos a cada segundo pelos veículos. No gráfico, os resultados referentes à solução “Sem Roteamento de Veículos” representam o *overhead* ocasionado pelo protocolo proposto neste trabalho (3 - Roniel) quando não é utilizado o mecanismo de minimização de congestionamentos. Em outras palavras, representam os pacotes transmitidos por esta solução para estimar e disseminar os níveis de congestionamentos, porém sem fazer alterações de rotas.

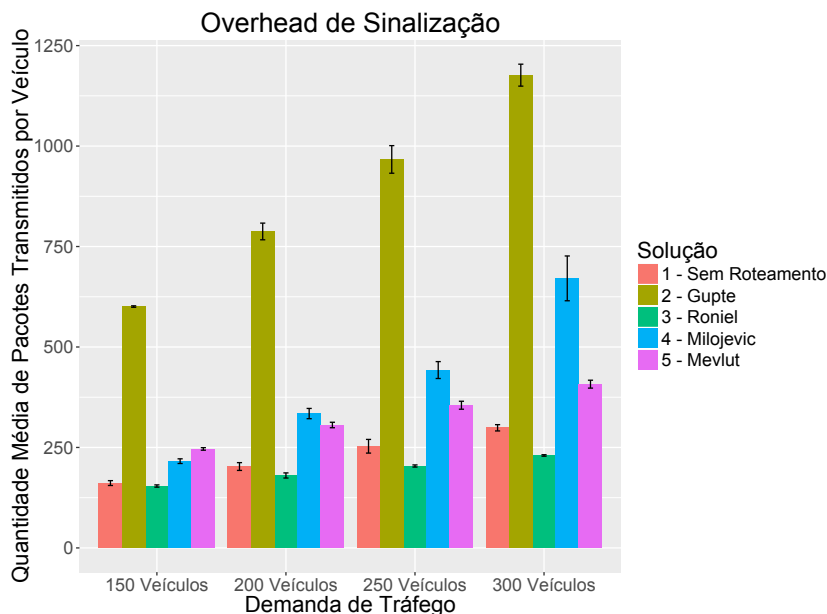


Figura 16 – Quantidade média de mensagens transmitidas pelos veículos.

Observa-se que em todos os trabalhos ocorre um aumento na quantidade de pacotes transmitidos por cada veículo à medida em que aumenta a demanda de tráfego. Nos resultados de Roniel e *Milojevic* isso acontece sobretudo devido às retransmissões de pacotes do algoritmo de *broadcast*. Essas retransmissões são realizadas pelos veículos quando estes recebem um pacote que deve ser disseminado. Já em *Gupte* e *Mevlut*, este fenômeno se dá porque todos os veículos em uma região, quando recebem requisições de outros veículos, respondem por meio das *reply-messages* e *congestion response messages*, respectivamente. Pode-se observar que a quantidade de mensagens transmitidas pela solução proposta é inferior às apresentadas pelos concorrentes em todos os cenários. No cenário com a maior demanda de tráfego este valor é aproximadamente 43% inferior ao segundo melhor resultado (*Mevlut*) e 80% inferior ao pior desempenho (*Gupte*).

Como dito anteriormente, um dos mecanismos utilizados neste trabalho foi inspirado pelo trabalho de *Milojevic*. Por esse motivo é importante comparar isoladamente o desempenho destes dois trabalhos em termos de *overhead* de sinalização. A Figura 17 apresenta a quantidade média de pacotes gerados por cada veículo nessas duas soluções. Neste gráfico são contados apenas os pacotes criados pelos veículos quando esses decidem que devem transmitir uma informação em toda a região por meio de um algoritmo de *broadcast* com múltiplos saltos. Desconsidera-se as retransmissões que os veículos fazem quando recebem um pacote pela primeira vez que deve ser retransmitido. É importante notar que foi utilizado o mesmo protocolo de *broadcast* de múltiplos saltos nas implementações de Roniel e *Milojevic*. Observa-se que a quantidade de mensagens geradas pelo protocolo de Roniel chega a ser cerca de 91% menor que a quantidade gerada por *Milojevic*. A principal característica da proposta que causa este resultado satisfatório é a utilização de *clusters* para o envio das informações para outras regiões.

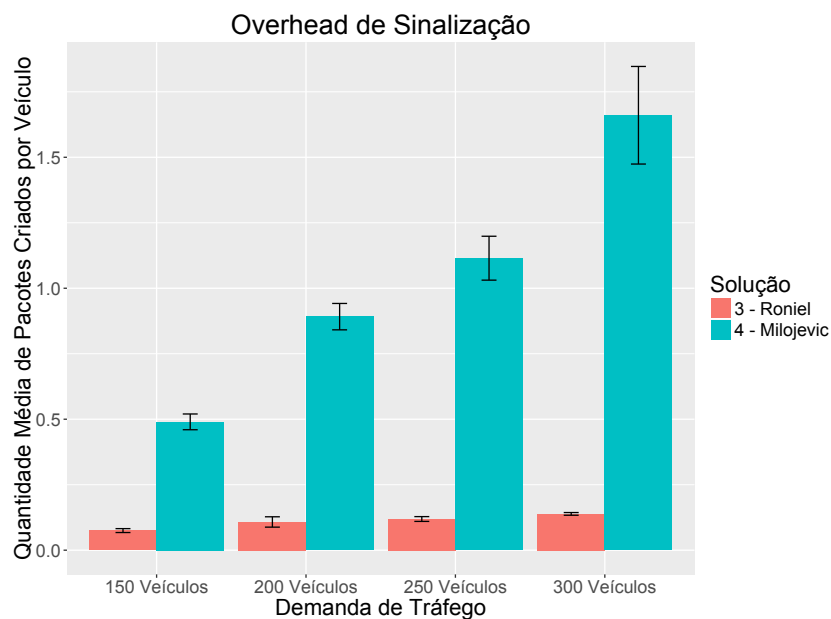


Figura 17 – Quantidade média de mensagens geradas por cada veículo em Roniel e *Milojevic*, desconsiderando as retransmissões.

4.4.1.2 Redução no Tempo Médio de Viagem dos Veículos

Conforme discutido anteriormente, simulações nas quais os veículos não faziam alterações de rotas foram realizadas com o objetivo de verificar a taxa de redução do tempo médio de viagem dos veículos.

A Figura 18 apresenta o tempo médio de viagem dos veículos em cada um dos cenários. As propostas deste trabalho de mestrado e a de *Milojevic* apresentaram os melhores resultados.

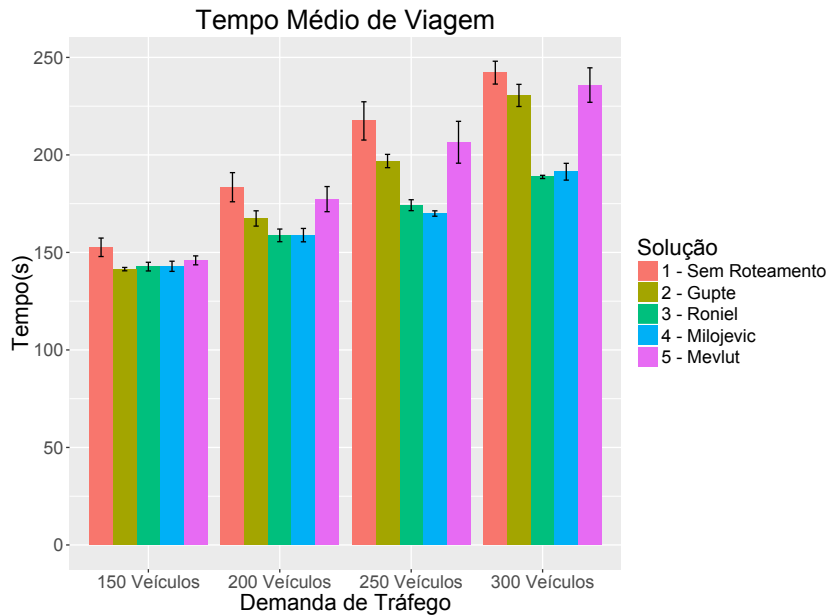


Figura 18 – Tempo médio levado por cada veículo para concluir o trajeto.

Ainda na Figura 18, verifica-se que o mecanismo de *clusters*, responsável pela redução do *overhead* de sinalização de Roniel em comparação com *Milojevic*, não acarreta em uma redução na qualidade das estimativas de congestionamentos. Comparando com os resultados obtidos quando não eram realizadas alterações de rotas, a redução do tempo médio de viagem dos veículos nesses dois trabalhos foi de aproximadamente 22% no cenário com maior demanda de tráfego. Observa-se que quanto maior a densidade de veículos, maior a redução no tempo médio de viagem dos veículos.

O trabalho de *Mevlut* não conseguiu reduzir o tempo médio de viagem dos veículos no cenário avaliado. Acredita-se que os principais fatores que influenciam para este resultado ruim são os tamanhos das rotas e o tamanho dos segmentos de via. Como todos os segmentos de via possuem 250 metros e o raio de alcance dos veículos é de aproximadamente 500 metros, existirão no máximo dois segmentos de via entre *checkpoints* seguidos, o que faz com que as opções de rotas alternativas criadas pelo trabalho de *Mevlut* seja reduzida. A Figura 19 ajuda a compreender esta explicação.

Na Figura 19a o veículo se encontra na primeira via da sua rota inicial. Neste momento é necessário verificar se existe uma rota alternativa melhor do que a rota inicial que leve o veículo da origem ao primeiro *checkpoint*. Pode-se observar que, como o raio de transmissão do veículo é de apenas 500 metros e os segmentos de via possuem 250 metros, existirão apenas dois segmentos de via até o próximo *checkpoint*. Com isso, existem poucas possibilidades de rotas alternativas que levam até o próximo *checkpoint*. O mesmo acontece quando o veículo alcança o primeiro e o segundo *checkpoints* (Figuras 19b e 19c). É importante ressaltar que a origem, o destino e os *checkpoints* da rota do veículo são representados por um segmento de via direcional. Por esse motivo fica impossível ao

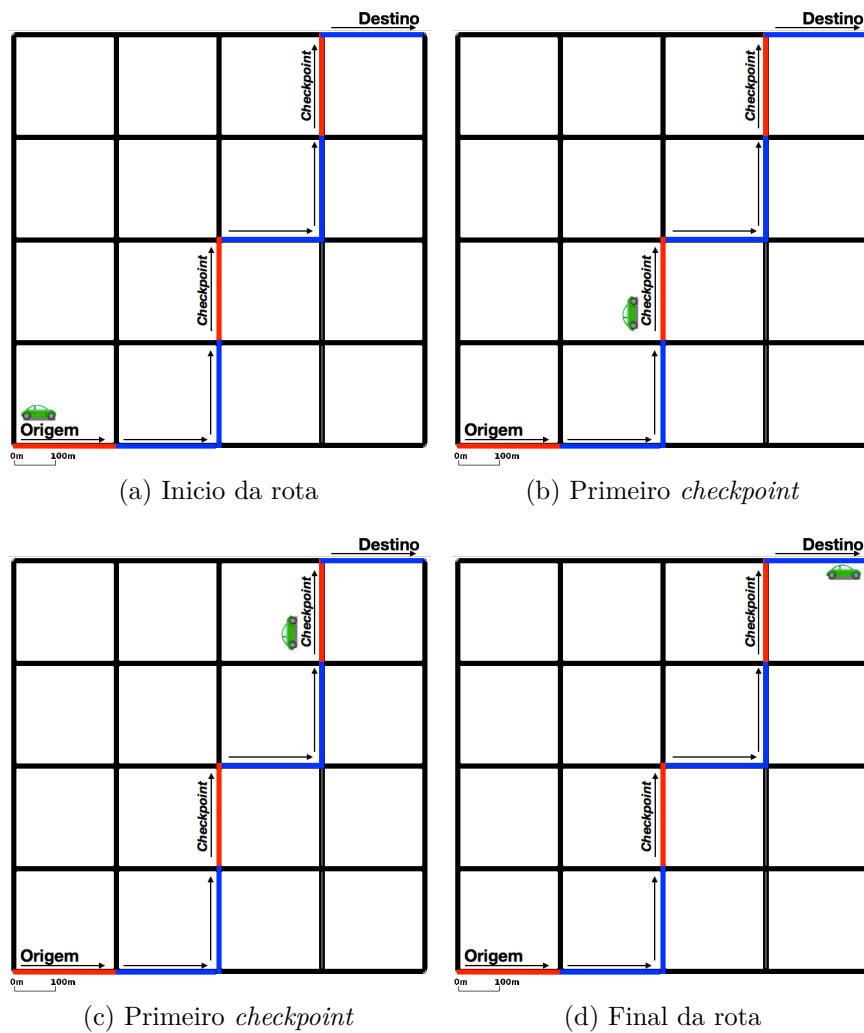


Figura 19 – Explicação do desempenho de *Mevlut*.

veículo com a rota representada na Figura 19 terminar o seu trajeto em uma via diferente da via “destino” presente nas imagens.

Já o trabalho de *Gupte*, mesmo sendo semelhante ao de *Mevlut*, obteve resultados superiores. Isso se dá pelos seguintes fatores. Em *Gupte* o cálculo das rotas é realizado de forma periódica, diferente do que acontece em *Mevlut*, em que este cálculo é feito apenas quando o veículo alcança um *checkpoint*. Isso faz com que a frequência de roteamento dos veículos em *Gupte* seja maior do que em *Mevlut*. Um outro fator é que em *Gupte* o cálculo das rotas é feito da posição em que o veículo se encontra até o destino final da sua rota. Por esse motivo a quantidade de possibilidades de rotas alternativas da solução de *Gupte* é maior do que a de *Mevlut*.

A Figura 20 apresenta as distâncias médias percorridas pelos veículos nos cenários simulados.

Observa-se que, com as alterações de rotas, os veículos acabam percorrendo uma distância maior. Isso acontece devido aos seguintes fatores: i) as novas rotas sempre possuem

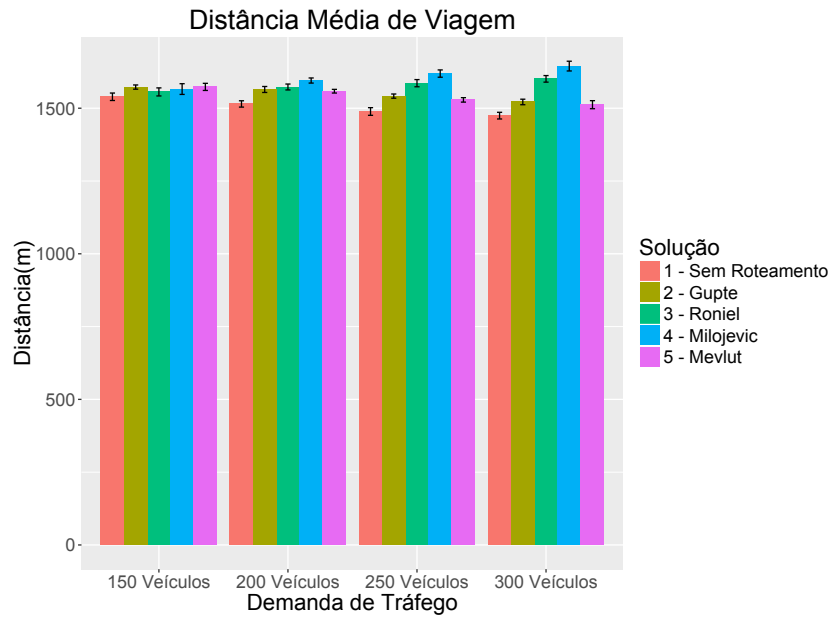


Figura 20 – Distância média percorrida por cada veículo.

uma distância maior ou igual à rota inicial (já que a rota inicial foi calculada por meio do algoritmo de menor caminho de *Dijkstra* sem considerar pesos de congestionamentos), ii) sem a alteração de rotas, os veículos passam a maior parte do tempo presos nos congestionamentos.

A Figura 21 mostra a porcentagem de veículos que completaram seus percursos em cada um dos cenários.

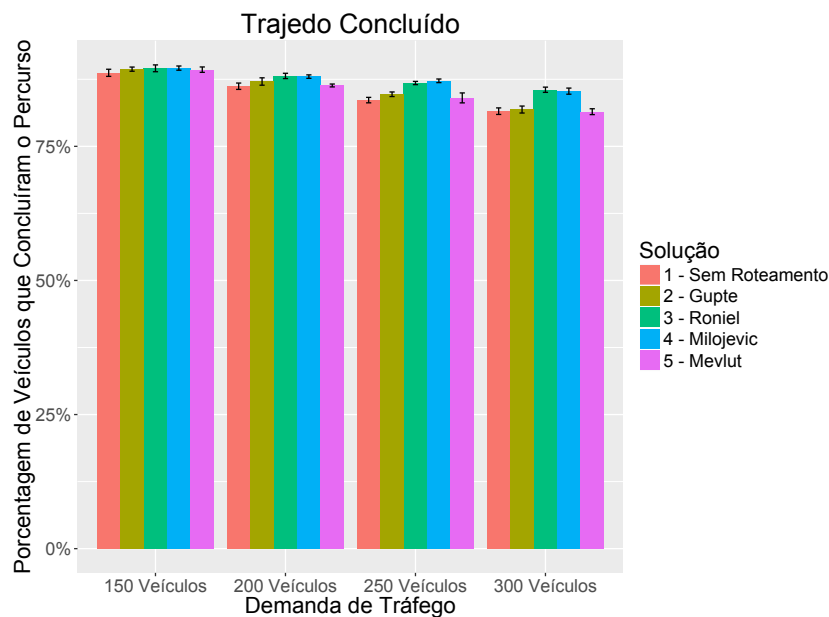


Figura 21 – Porcentagem de veículos que completaram o seu percurso.

Observa-se que no cenário sem alteração de rotas a quantidade de veículos que completaram seus percursos é menor do que nos cenários em que foram utilizadas as

soluções para redução de congestionamentos. Isso ocorre porque, sem a alteração de rotas, os veículos ficam mais tempo presos em congestionamentos e acabam não concluindo seus percursos a tempo.

Pode-se verificar ainda uma relação direta entre a redução do tempo médio de viagem dos veículos e a quantidade de veículos que concluíram os trajetos. Quanto mais eficiente a solução em reduzir o tempo de viagem, maior a quantidade de veículos que conseguem alcançar o destino antes do término das simulações. Isso comprova a capacidade da solução proposta neste trabalho de mestrado em sugerir as melhores rotas para os motoristas.

Para finalizar, a Figura 22 exibe a taxa de emissão de CO₂ nos cenários avaliados. Foi utilizado um modelo de transmissão estatístico chamado EMIT (CAPPIELLO et al., 2002) para calcular as taxas de emissão de CO₂ dos veículos. Mais informações sobre a implementação do modelo de transmissão no simulador Veins podem ser encontradas em (SOMMER et al., 2010).

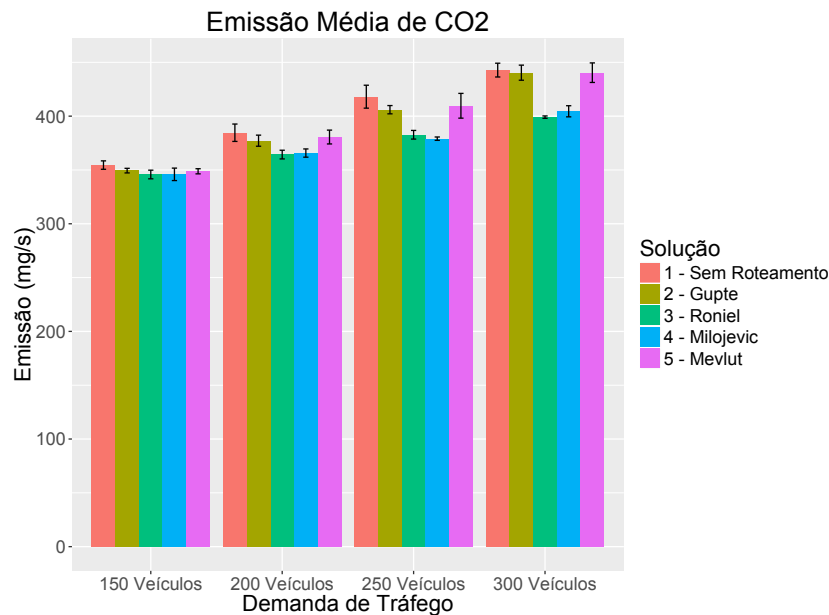


Figura 22 – Emissão média de CO₂ pelos veículos.

Nota-se que a taxa de emissão de CO₂ é menor com a utilização da solução proposta para reduzir os congestionamentos. Os trabalhos de *Gupte* e *Mevlut* apresentaram as piores taxas de emissão de CO₂. Isso ocorre devido à baixa capacidade dessas soluções em reduzir o tempo médio de viagem dos veículos, no cenário avaliado.

4.4.2 LuST

Foi realizado um estudo de avaliação de desempenho em um cenário real. O cenário escolhido, que representa a cidade de Luxemburgo, foi desenvolvido por um grupo de

pesquisa chamado *VehicularLab*, localizado na Universidade de Luxemburgo. Detalhes sobre o trabalho realizado podem ser encontrados em (CODECA; FRANK; ENGEL, 2015).

A Figura 23 apresenta o mapa da cidade de Luxemburgo utilizado nas simulações e a Tabela 6 expõe alguns números referentes à topologia deste cenário.

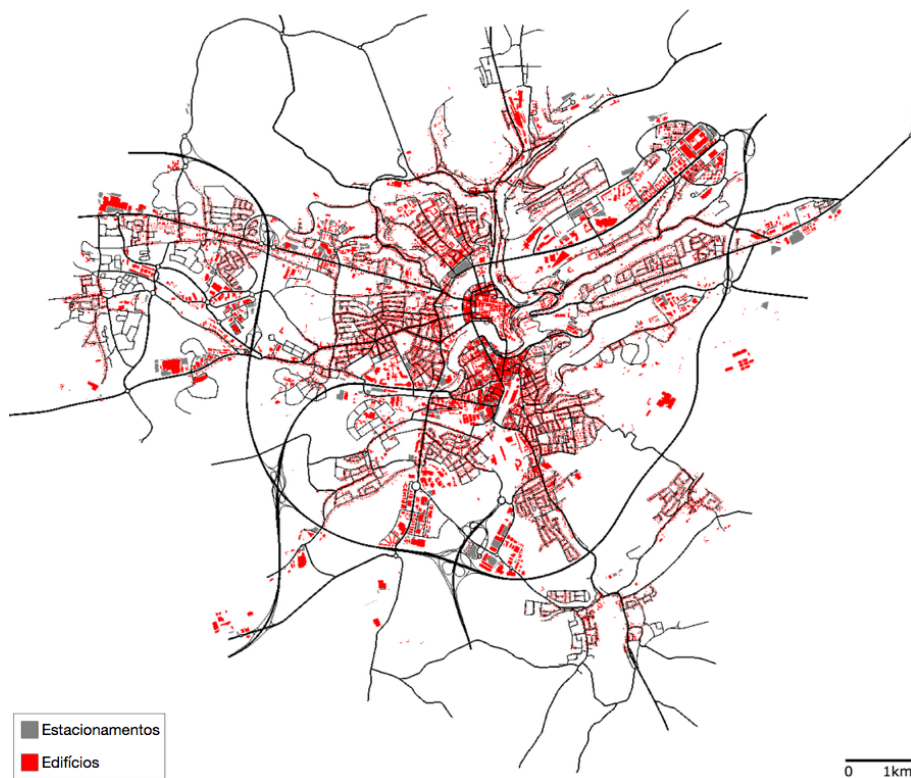


Figura 23 – Mapa da cidade de Luxemburgo utilizado nas simulações. Figura adaptada de (CODECA; FRANK; ENGEL, 2015).

	Valor
Área	155,95 km^2
Quantidade de nós	2.372
Quantidade de arestas	5.969
Tamanho total das arestas	931,12 km^2
Tamanho total das faixas	1.571,4 km^2
Arestas com uma faixa	3.944
Arestas com duas faixas	1.188
Arestas com três faixas	764
Arestas com quatro faixas	78

Tabela 6 – Valores referentes à topologia do cenário *LuST*.

Devido à complexidade do cenário e limitações computacionais não foi possível simular os trabalhos relacionados. Por exemplo, para concluir uma das simulações da solução proposta foram necessários 21 dias. Assim, nesse cenário, foi avaliado apenas a capacidade da solução proposta neste trabalho de mestrado em reduzir o tempo médio de viagem dos veículos. Para isso também foram realizadas simulações nas quais os veículos não faziam alterações de rotas.

O cenário apresentado em (CODECA; FRANK; ENGEL, 2015) possui uma demanda de tráfego referente a 24 horas de simulação e que foi criada com base em dados reais sobre o trânsito de Luxemburgo. A Figura 24 exibe a quantidade de veículos ao longo das 24 horas. É possível verificar que os horários de pico são referentes aos horários de início de expediente e final de expediente (das 7 às 9 horas e das 18 às 20 horas).

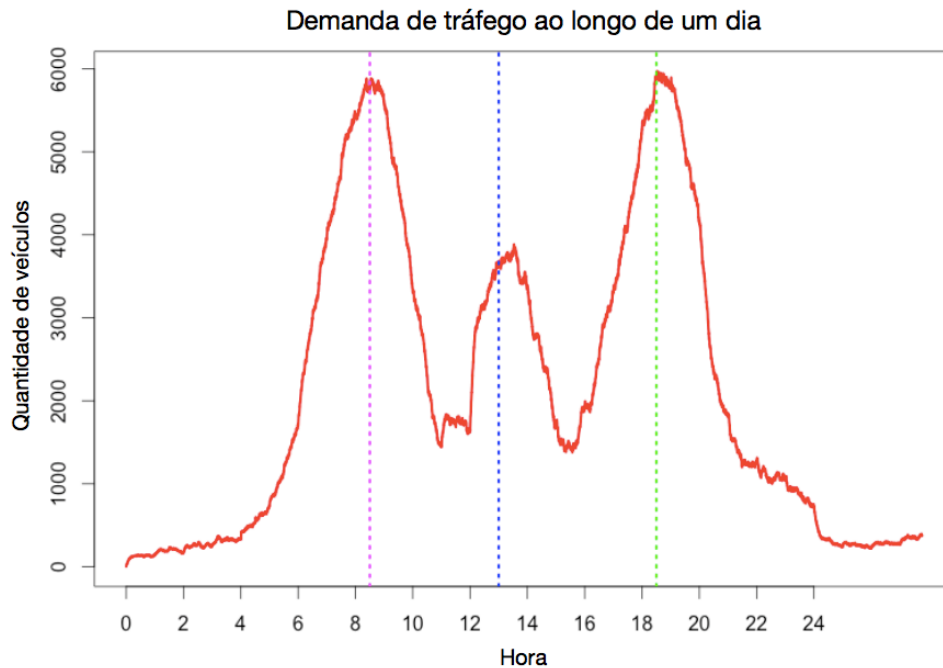


Figura 24 – Quantidade de veículos ao longo das 24 horas.

Por causa da complexidade do cenário, foi simulado apenas uma faixa de 1200 segundos dentro das 24 horas disponíveis no cenário. A faixa escolhida foi das 13 horas até as 13 horas e 20 minutos. Essa faixa foi escolhida porque não foi possível realizar simulações nas faixas com maiores congestionamentos utilizando os recursos computacionais disponíveis. A Tabela 7 resume os principais parâmetros utilizados nas simulações do cenário LuST.

Parâmetro	Valor
Duração	1200 segundos
Demanda de tráfego	Baseada em dados reais
Potência de transmissão	7,1 miliwatts (300 metros de alcance)
Frequência de transmissão de <i>beacons</i>	1 Hz
Velocidade máxima dos veículos	Variável (depende da velocidade máxima permitida na via)

Tabela 7 – Parâmetros utilizados nas simulações do cenário LuST.

A Figura 25 apresenta o tempo médio de viagem dos veículos nos cenários com alteração de rotas e sem alteração de rotas. A redução do tempo médio de viagem dos veículos foi de apenas 1,72%. Essa redução pequena ocorreu por conta da baixa demanda de tráfego na faixa simulada, o que faz com que se formem poucos congestionamentos no cenário.

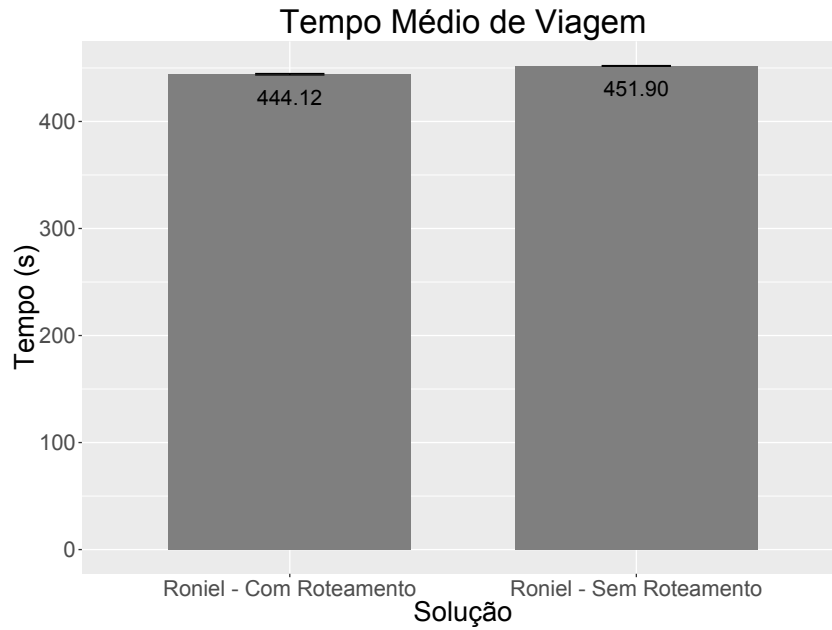


Figura 25 – Tempo médio levado por cada veículo para concluir o trajeto no cenário *LuST*.

A Figura 26 apresenta as distâncias médias percorridas pelos veículos. Semelhante ao que ocorreu no cenário *Manhattan Grid*, com as mudanças de rotas os veículos acabam percorrendo uma distância maior. Conforme discutido, isso ocorre por dois motivos. Com as alterações de rotas, os veículos selecionam rotas mais longas do que as calculadas inicialmente. Já sem as alterações de rotas, os veículos ficam mais tempo presos em congestionamentos.

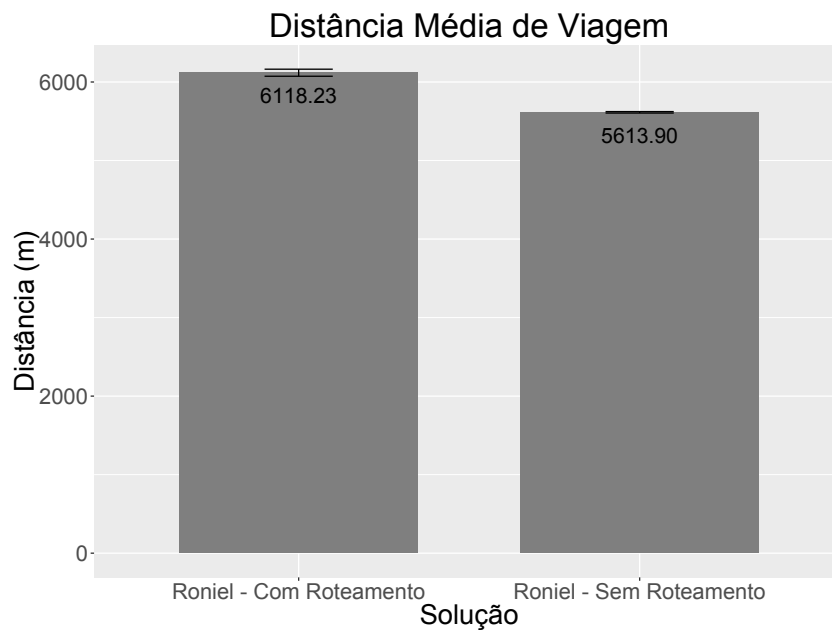


Figura 26 – Distância média percorrida por cada veículo no cenário *LuST*.

A Figura 27 mostra a porcentagem de veículos que completaram seus percursos no cenário de Luxemburgo. Nota-se que com as alterações de rotas a quantidade de veículos

que completaram seus percursos é maior do que no cenário sem alterações de rotas. Da mesma forma que no cenário *Manhattan Grid*, isso ocorre porque sem as alterações de rotas os veículos ficam mais tempo presos em congestionamentos e acabam não concluindo seu percurso a tempo.

É importante observar que a quantidade de veículos que terminaram seu trajeto antes da finalização das simulações foi menor do que 50%. Isso ocorre porque, neste cenário, as rotas dos veículos são maiores do que no *Manhattan Grid*, o que faz com que os 20 minutos de simulação sejam insuficientes para a maior parte dos veículos concluírem suas rotas.

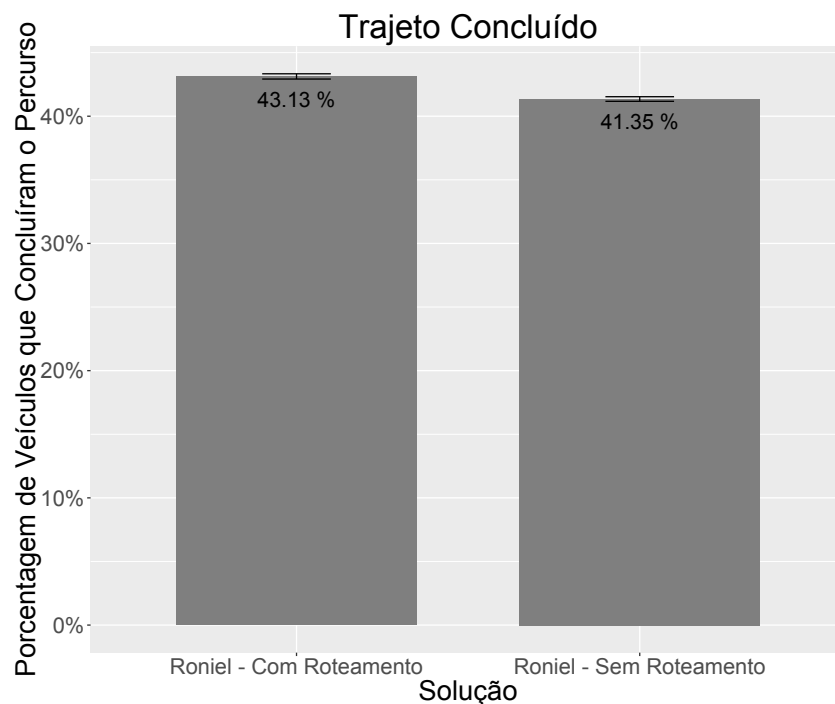


Figura 27 – Porcentagem de veículos que completaram o seu percurso no cenário *LuST*.

A Figura 28 exibe a quantidade média de CO₂ emitido por cada veículo. Diferente do que acontece no cenário *Manhattan Grid*, a taxa de emissão de CO₂ é maior com a utilização da solução proposta para reduzir os congestionamentos. Dois fatores justificam esse comportamento. Primeiro, com as alterações de rotas, os veículos percorreram distâncias maiores, assim como acontece no cenário *Manhattan Grid*. Por outro lado, a redução do tempo médio de viagem dos veículos no cenário *LuST* foi menor do que no cenário *Manhattan Grid*. Assim, não foi possível, na faixa dos 20 minutos avaliados, obter uma redução no tempo médio de viagem dos veículos significativa a ponto de também reduzir a emissão de CO₂.

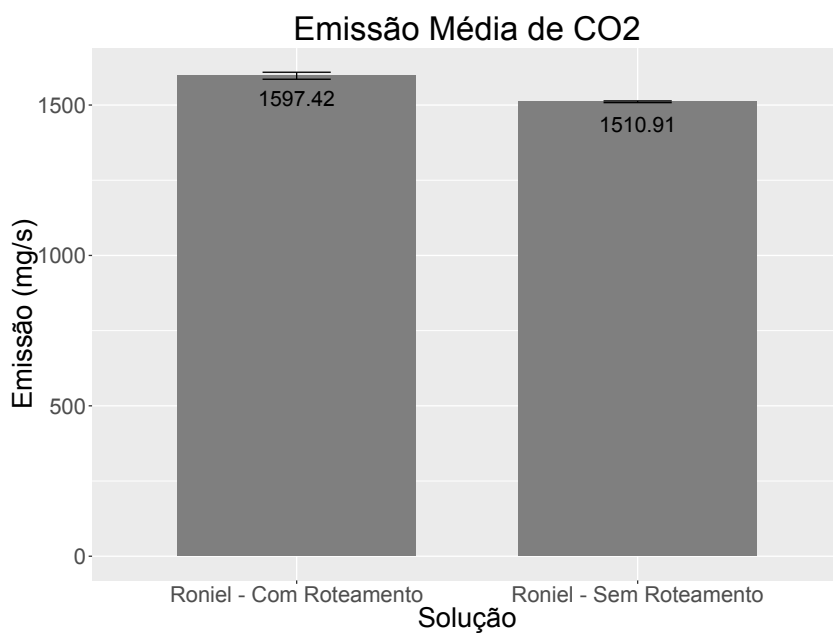


Figura 28 – Emissão média de CO₂ pelos veículos no cenário *LuST*.

5 Conclusões

Neste trabalho foi proposto um protocolo para as redes veiculares que tem como objetivo reduzir o tempo médio de viagem dos veículos em ambientes urbanos. Algumas das características do protocolo são apresentar um baixo *overhead* de sinalização e utilizar apenas as comunicações V2V, ou seja, ser independente da existência de unidades de acostamento.

Foi apresentado uma revisão bibliográfica sobre as principais soluções para redução de congestionamentos utilizando redes veiculares. Os trabalhos foram classificados por meio das seguintes características: 1) quantificação de congestionamentos, 2) disseminação de informações entre veículos em vias diferentes, 3) arquitetura de comunicação utilizada (V2V, V2I ou V2X) e 4) alteração de rotas.

Também foi apresentado um estudo de avaliação de desempenho no qual o protocolo proposto foi comparado com os trabalhos relacionados que possuem as características almeçadas neste trabalho de mestrado. Foram utilizados dois cenários de avaliação. Um cenário genérico, chamado de *Manhattan Grid*, que é amplamente utilizado na literatura para avaliar protocolos em ambientes urbanos (MILOJEVIC; RAKOCEVIC, 2014) (ARAÚJO et al., 2014) (GARIP et al., 2015), e um cenário real, chamado de *LuST*, que representa a cidade de Luxemburgo (CODECA; FRANK; ENGEL, 2015).

No cenário *Manhattan Grid*, o protocolo foi comparado com as soluções apresentadas em (MILOJEVIC; RAKOCEVIC, 2014), (GUPTA; YOUNIS, 2012) e (GARIP et al., 2015). Verificou-se o uso mais eficiente do meio sem fio pelo protocolo proposto. A quantidade de mensagens geradas pelo protocolo proposto chegou a ser aproximadamente 43% menor que o segundo melhor resultado e 80% menor que o protocolo que apresentou o pior desempenho. Também foi avaliada a capacidade do protocolo em minimizar os congestionamentos utilizando as estimativas de congestionamentos para o cálculo de melhores rotas para os veículos. A proposta, junto ao trabalho de (MILOJEVIC; RAKOCEVIC, 2014), apresentou os melhores resultados. Foi obtida uma redução de até 22% no tempo médio de viagem dos veículos.

O cenário *LuST*, que representa a cidade de Luxemburgo, possui uma demanda de tráfego de 24 horas baseada em dados reais sobre o trânsito da cidade. O objetivo inicial era avaliar o protocolo proposto e os trabalhos relacionados em horários do cenário com diferentes condições de trânsito. Porém, devido à complexidade do cenário e limitações computacionais, não foi possível realizar simulações nos horários com as piores condições de trânsito. Pelo mesmo motivo, não foi possível avaliar os trabalhos relacionados neste cenário. Desta forma, foi avaliada apenas a capacidade do protocolo proposto neste trabalho

de mestrado em reduzir o tempo médio de viagem dos veículos. As simulações realizadas foram referentes a uma janela de apenas 12 minutos. Foram necessários 21 dias para concluir uma única simulação, o que demonstra a complexidade do cenário avaliado. Com isso, não foi possível avaliar o protocolo de forma definitiva no cenário *LuST*. Ainda assim, verificou-se uma pequena redução no tempo de viagem dos veículos, mesmo com o pouco tempo simulado. Os resultados obtidos demonstram a capacidade do protocolo em reduzir os congestionamentos no cenário *LuST*.

Como trabalhos futuros, pretende-se realizar um estudo completo no cenário da cidade de Luxemburgo, incluindo os trabalhos relacionados. Para isso será necessário implementar módulos no simulador que possibilitem um uso mais eficiente dos recursos computacionais disponíveis. Também é preciso otimizar as implementações dos protocolos estudados, de forma que isso reduza a complexidade computacional das simulações.

Referências

- AISSAOUI, R. et al. Advanced real-time traffic monitoring system based on V2X communications. In: *IEEE International Conference on Communications (ICC)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 2713–2718. Citado 6 vezes nas páginas 1, 9, 13, 14, 20 e 26.
- ALVES, R. dos S.; CAMPBELL, I. do V.; COUTO, R. de S. Redes veiculares: Princípios, aplicações e desafios. In: _____. *Minicursos do Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores - SBRC'2009*. [S.l.]: Sociedade Brasileira de Computação, 2009. cap. 5, p. 199–254. Citado 5 vezes nas páginas 9, 1, 2, 5 e 6.
- ARAÚJO, G. B. et al. Um protocolo de identificação e minimização de congestionamentos de tráfego para redes veiculares. In: *XXXII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*. Florianópolis: [s.n.], 2014. p. 207 – 220. Citado 9 vezes nas páginas 9, 1, 13, 14, 17, 18, 20, 30 e 43.
- BELLAVISTA, P.; FOSCHINI, L.; ZAMAGNI, E. V2X protocols for low-penetration-rate and cooperative traffic estimations. In: *IEEE 80th Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–6. Citado 4 vezes nas páginas 9, 13, 14 e 20.
- BOOYSEN, M. J.; ZEADALLY, S.; ROOYEN, G. J. van. Survey of media access control protocols for vehicular ad hoc networks. *IET Communications*, v. 5, n. 11, p. 1619–1631, July 2011. ISSN 1751-8628. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 6.
- CAPPIELLO, A. et al. A statistical model of vehicle emissions and fuel consumption. In: *The IEEE 5th International Conference on Intelligent Transportation Systems*. [S.l.: s.n.], 2002. p. 801–809. Citado na página 37.
- CEBR. *The future economic and environmental costs of gridlock in 2030*. [S.l.], 2014. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 12.
- CINTRA, M. A crise do trânsito em são paulo e seus custos. *GV-executivo*, Julho 2013. Citado na página 1.
- CODECA, L.; FRANK, R.; ENGEL, T. Luxembourg sumo traffic (LuST) scenario: 24 hours of mobility for vehicular networking research. In: *IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–8. Citado 4 vezes nas páginas 9, 38, 39 e 43.
- DIJKSTRA, E. W. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, v. 1, n. 1, p. 269–271, 1959. ISSN 0945-3245. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/BF01386390>>. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 29.
- ETSI. *Cars ‘Talking and Hearing in Harmony’ - a Smart Move for ETSI! Newly published ETSI Harmonized Standard enables market placement of radio equipment for road safety and traffic management*. [S.l.], 2008. Disponível em: <<http://www.etsi.org/index.php/news-events/news/226-press-release-30th-september-2008>>. Citado na página 7.
- FCC. *FCC allocates spectrum in 5.9 GHz range for intelligent transportation system uses*. 445 12th Street, S.W., Washington, D.C. 20554: [s.n.], 1999. Disponível em:

- https://transition.fcc.gov/Bureaus/Engineering_Technology/News_Releases/1999/nret9006.html>. Citado na página 7.
- FEUKEU, E. A.; DJOUANI, K.; KURIEN, A. Compensating the effect of doppler shift in a vehicular network. In: *IEEE AFRICON*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–7. ISSN 2153-0025. Citado na página 6.
- FEUKEU, E. A.; NGWIRA, S. M.; ZUVA, T. Doppler shift signature for bpsk in a vehicular network: Ieee 802.11p. In: *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1744–1749. ISSN 2152-7431. Citado na página 6.
- GARIP, M. T. et al. Scalable reactive vehicle-to-vehicle congestion avoidance mechanism. In: *12th Annual IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 943–948. ISSN 2331-9860. Citado 13 vezes nas páginas 9, 1, 2, 5, 10, 13, 14, 18, 20, 29, 30, 31 e 43.
- GEER, S. A. Least-squares estimation. In: _____. *Wiley StatsRef: Statistics Reference Online*. John Wiley & Sons, Ltd, 2014. ISBN 9781118445112. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/9781118445112.stat03982>>. Citado na página 16.
- GERALDO, J.; CAMPISTA, M.; COSTA, L. A decentralized traffic monitoring system based on vehicle-to-infrastructure communications. In: *IFIP Wireless Days (WD)*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–6. ISSN 2156-9711. Citado 4 vezes nas páginas 9, 13, 14 e 20.
- GRAMAGLIA, M.; CALDERON, M.; BERNARDOS, C. Abeona monitored traffic: Vanet-assisted cooperative traffic congestion forecasting. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, v. 9, n. 2, p. 50–57, June 2014. ISSN 1556-6072. Citado 9 vezes nas páginas 9, 1, 13, 14, 15, 16, 20, 26 e 30.
- GUPTE, S.; YOUNIS, M. Vehicular networking for intelligent and autonomous traffic management. In: *IEEE International Conference on Communications (ICC)*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 5306–5310. ISSN 1550-3607. Citado 10 vezes nas páginas 9, 10, 13, 14, 18, 19, 20, 29, 31 e 43.
- IEEE Guide for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Architecture. *IEEE Std 1609.0-2013*, p. 1–78, March 2014. Citado 3 vezes nas páginas 9, 7 e 8.
- IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) – Multi-Channel Operation. *IEEE Std 1609.4-2016 (Revision of IEEE Std 1609.4-2010)*, p. 1–94, March 2016. Citado na página 8.
- INTELLIGENT Transport Systems (ITS); European profile standard for the physical and medium access control layer of Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz frequency band. *ETSI ES 202 663 V1.1.0 (2010-01)*, 2010. Citado na página 9.
- KARAGIANNIS, G. et al. Vehicular networking: A survey and tutorial on requirements, architectures, challenges, standards and solutions. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 13, n. 4, p. 584–616, Fourth 2011. ISSN 1553-877X. Citado na página 9.
- KRAJZEWICZ, D. et al. Recent development and applications of SUMO - Simulation of Urban MObility. *International Journal on Advances in Systems and Measurements*, v. 5, n. 3&4, p. 128–138, December 2012. Citado na página 29.

- LOMAX, T.; BOARD, N. R. C. U. T. R.; INSTITUTE, T. T. *Quantifying Congestion*. National Academy Press, 1997. (Report (National Cooperative Highway Research Program), N° 398;N° 1465). ISSN 0077-5614. ISBN 9780309060714. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=egEnAQAAAJ>>. Citado na página 23.
- MILOJEVIC, M.; RAKOCEVIC, V. Distributed road traffic congestion quantification using cooperative vanets. In: *13th Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop (MED-HOC-NET)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 203–210. Citado 11 vezes nas páginas 1, 9, 13, 14, 16, 20, 23, 29, 30, 31 e 43.
- MIR, Z. H.; FILALI, F. Lte and ieee 802.11p for vehicular networking: a performance evaluation. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, v. 2014, n. 1, p. 1–15, 2014. ISSN 1687-1499. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1186/1687-1499-2014-89>>. Citado na página 9.
- MÖLLER, A.; KÜRNER, T. Lte link level performance evaluation using stochastic channel models for v2x communication. In: *IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 25–31. Citado na página 9.
- RAO, A. M.; RAO, K. R. Measuring urban traffic congestion - a review. *International Journal for Traffic and Transport Engineering*, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.
- SCHRANK, D.; EISELE, B.; BAK, J. *2015 Urban Mobility Scorecard*. [S.l.], 2015. Citado na página 11.
- SILVA, F. et al. Conprova: A smart context provisioning middleware for vanet applications. In: *IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–5. ISSN 1550-2252. Citado na página 1.
- SOMMER, C. et al. A computationally inexpensive empirical model of ieee 802.11p radio shadowing in urban environments. In: *Eighth International Conference on Wireless On-Demand Network Systems and Services (WONS)*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 84–90. Citado na página 6.
- SOMMER, C.; GERMAN, R.; DRESSLER, F. Bidirectionally Coupled Network and Road Traffic Simulation for Improved IVC Analysis. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, IEEE, v. 10, n. 1, p. 3–15, January 2011. Citado na página 29.
- SOMMER, C. et al. Emissions vs. Travel Time: Simulative Evaluation of the Environmental Impact of ITS. In: *71st IEEE Vehicular Technology Conference (VTC2010-Spring)*. Taipei, Taiwan: IEEE, 2010. p. 1–5. Citado na página 37.
- SOUSA, R. S. de; SOARES, A. C. B. Estimativa e sinalização de congestionamentos de tráfego através de redes veiculares V2V. In: *XXXIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*. Vitória: [s.n.], 2015. Citado 3 vezes nas páginas 3, 9 e 21.
- TRANSPORT, I. A. of P. *The future of urban mobility*. [S.l.], 2013. Citado na página 1.
- VARGA, A.; HORNIG, R. An overview of the omnet++ simulation environment. In: *Proceedings of the 1st International Conference on Simulation Tools and Techniques for Communications, Networks and Systems & Workshops*. ICST, Brussels, Belgium, Belgium: ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications

Engineering), 2008. (Simutools '08), p. 60:1–60:10. ISBN 978-963-9799-20-2. Disponível em: <<http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1416222.1416290>>. Citado na página 29.

WAZE. *Aplicativo gratuito de trânsito e navegação baseado em mapas da comunidade*. 2006. Disponível em: <<https://www.waze.com/pt-BR/>>. Citado na página 2.

WISCHOFF, L. et al. Sotis - a self-organizing traffic information system. In: *The 57th IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference (VTC 2003-Spring)*. [S.l.: s.n.], 2003. v. 1, p. 2442 – 2446. Citado 4 vezes nas páginas 1, 10, 13 e 14.

WISITPONGPHAN, N. et al. Broadcast storm mitigation techniques in vehicular ad hoc networks. *IEEE Wireless Communications*, v. 14, n. 6, p. 84–94, December 2007. ISSN 1536-1284. Citado na página 1.

XIE, L. F. et al. Mitigating doppler effects on physical-layer network coding in vanet. In: *IEEE 26th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 121–126. Citado na página 6.

XU, J. et al. Greenswirl: Combining traffic signal control and route guidance for reducing traffic congestion. In: *IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 175–182. Citado 4 vezes nas páginas 9, 13, 14 e 20.

YOUNES, M.; BOUKERCHE, A. Efficient traffic congestion detection protocol for next generation vanets. In: *IEEE International Conference on Communications (ICC)*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 3764–3768. ISSN 1550-3607. Citado 5 vezes nas páginas 1, 9, 13, 14 e 20.

ZHANG, S.; CAHILL, V. Reservation protocol: Towards collision-free transmission in vehicular ad-hoc networks (poster). In: *IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 268–275. ISSN 2157-9857. Citado na página 6.