



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

Um Algoritmo Aprimorado de Controle Inteligente de Semáforo com Pelotões Veiculares Mais Acurados

Arinaldo Lopes da Silva

Teresina-PI, Setembro de 2018

Arinaldo Lopes da Silva

Um Algoritmo Aprimorado de Controle Inteligente de Semáforo com Pelotões Veiculares Mais Acurados

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da UFPI (área de concentração: Ciência da 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

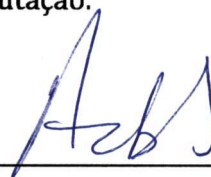
Setembro de 2018

“Um Algoritmo Aprimorado de Controle Inteligente de Semáforo com Pelotões Veiculares Mais Acurados”

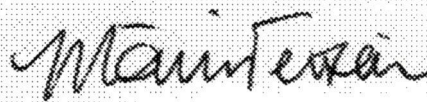
ARINALDO LOPES DA SILVA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação do Centro de Ciências da Natureza da Universidade Federal do Piauí, como parte integrante dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Ciência da Computação.

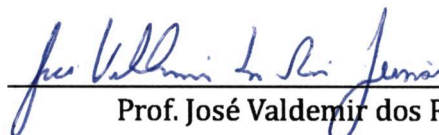
Aprovada por:



Prof. André Castelo Branco Soares
(Presidente da Banca Examinadora)



Prof. Mário Antonio Meireles Teixeira
(Examinador Externo)



Prof. José Valdemir dos Reis Júnior
(Examinador Interno)



Prof. Ricardo de Andrade Lira Rabêlo
(Examinador Interno)

Teresina, 20 de setembro de 2018

Agradecimentos

Agradeço a Deus.

Agradeço aos meus pais, José Lopes e Maria da Luz, por todo amor e dedicação. Obrigado por sempre cuidarem tão bem de mim.

À minha esposa, Célia, pelo seu amor, carinho, paciência e companheirismo nesta e em tantas outras etapas. Seu apoio sempre me motiva a ir além.

Aos meus filhos, Rafael e Renan, pelas brincadeiras e sorrisos em momentos tão oportunamente bem-vindos. Vocês sempre me fazem querer ser uma pessoa melhor.

Aos meus irmãos, pela companhia e incentivo. Em especial, ao Adroaldo pelo grande apoio na minha educação, pelo otimismo que sempre deposita em mim e pelos valiosos conselhos. E carinhosamente, à Alberiza por todos os momentos de alegria proporcionados e pela confiança que sempre tem em mim.

À minha tia Fransquinha e família, pelo apoio de sempre. Em especial, ao meu primo Ricardo Márcio, pela presença e amizade construída ao longo dos anos de estudo.

Ao meu tio Edivaldo e família, pela ajuda em etapas importantes anteriores a esta.

Ao meu tio Lourenço e família, pela torcida e apoio.

Aos meus avós maternos, Antônia Crispim (*in memoriam*) e Norberto Gomes (*in memoriam*), pelo carinho e bons exemplos.

Aos meus avós paternos, Pedrina Pires (*in memoriam*) e Antônio Lopes (*in memoriam*), pelo afeto e valores.

Ao meu sogro Dico e família, pelo apoio de sempre. Principalmente, à minha sogra Deusalina e aos meus cunhados Valdenilson e Jesus.

Aos meus amigos, pela compreensão de todos os momentos em que não pude estar presente durante este período. Em especial, aos amigos Alex e Cristiano pela companhia agradável nas idas e vindas à UFPI.

Aos colegas da Superintendência de Tecnologia da Informação (STI) da UFPI, pelo apoio em suprir meus momentos de ausência, pela amizade e torcida pelo meu sucesso. Em especial, aos amigos: Robert, Péricles, Anathália, Mário (Coordenador de Infraestrutura exemplar), Erasmo, Maurício, Felipe Augusto, Filipe Soares, Cristiano (de novo!), Diego, Ênio, Giselle, Arizovane, Joara, Euclides, Marcelo, Italberto, Taison, Pacheco, Ronivon, Maurílio, Matheus, Kannya, Francisco, Clédjan, Constança, Delson e Ricardo Lira (Superintendente 100% dedicado).

Aos colegas do Núcleo de Computação de Alto Desempenho (NCAD) da UFPI que caminharam comigo durante essa jornada: Roniel, Galeno, Felipe Saraiva, Martony, Selles, Aline Leal, Enza Rafaela, Taísa Alves, Vítor Almeida, Imperes, Tarcísio e Justina.

Aos professores que contribuíram de forma especial ao longo desse período de formação acadêmica: Rodrigo Veras, Vinícius Machado, Raimundo Moura, Pedro Alcântara, Ivan Saraiva, Ricardo Lira (de novo!) e José Valdemir.

Agradeço ao meu orientador, André Castelo Branco Soares, pela atenção, paciência e motivação nessa jornada, sempre se esforçando para que o resultado final fosse o melhor possível. Sua contribuição para meu crescimento profissional, científico e intelectual foi notável.

Por fim, agradeço imensamente à Universidade Federal do Piauí.

*“A diferença entre o sonho e a realidade
é a quantidade certa de tempo e trabalho.”
(William Douglas)*

Resumo

Os congestionamentos de trânsito nos grandes centros urbanos vêm aumentando a cada ano e prejudicando a mobilidade das pessoas. Além disso, causam stress aos motoristas, consumo excessivo de combustível e intensificam a degradação do meio ambiente por meio da emissão do dióxido de carbono (CO₂). As interseções entre as vias são pontos que podem contribuir significativamente para o aumento dos congestionamentos de trânsito. O uso de semáforos nesses pontos pode ajudar a controlar o trânsito e reduzir os congestionamentos. A configuração de temporização desses semáforos também é um fator importante a ser considerado. Normalmente, a maioria dos semáforos controla os fluxos nas interseções de acordo com configurações de tempo fixo. Porém, os fluxos de veículos, em cada uma das vias de uma interseção, nem sempre possuem as mesmas características no decorrer do tempo. Para controlar o fluxo de veículos nas interseções de forma mais eficiente, é preciso que os semáforos operem de forma adaptativa, considerando informações de tráfego em cada uma das vias que ele controla. Uma das tecnologias utilizadas para obtenção dessas informações de tráfego pelos semáforos são as redes veiculares. As redes veiculares (VANETs - *Vehicular Ad hoc Networks*) são um tipo particular de rede móvel *ad hoc* na qual cada veículo é dotado de uma OBU (*On-Board Unit*), que periodicamente envia informações na rede. Além disso, um semáforo pode operar como uma RSU (*Road Side Unit*) que permite a recepção das informações enviadas pelas OBUs. Utilizando redes veiculares, este trabalho apresenta um algoritmo de controle adaptativo de semáforo reformulado a partir de um aperfeiçoamento da melhor solução encontrada na literatura até então, o ITLC (*Intelligent Traffic Light Controlling*). O trabalho também apresenta uma revisão sobre ITLC e outras 11 soluções da literatura. O ITLC escalona pelotões de veículos, delimitados por uma área virtual no entorno de um semáforo, para cruzar a interseção conforme suas características de tráfego. As contribuições deste trabalho incidem na forma como os pelotões de veículos são formados e atualizados em relação ao ITLC original. Foram realizados experimentos em ambiente sintético simulado para avaliar o desempenho do algoritmo aprimorado. Verificou-se que o atraso médio dos veículos no semáforo, utilizando o algoritmo aprimorado, foi em média 20% menor que o ITLC. Já a vazão de veículos no semáforo foi aumentada em média 8% em relação ao ITLC. Também foram observadas reduções na emissão média de CO₂ pelos veículos, bem como na média de pacotes transmitidos pelas OBUs dos veículos comparado ao ITLC. Adicionalmente, foram simulados experimentos em um cruzamento realístico, localizado na cidade de Bolonha na Itália, que reafirmaram os resultados obtidos no cenário sintético.

Palavras-chaves: Controle inteligente de semáforo. Pelotões de veículos. Redes veiculares.

Abstract

Traffic congestion in large urban centers has been increasing every year and hampering the mobility of people. In addition, they cause stress to drivers, excessive fuel consumption and intensify environmental degradation through the emission of carbon dioxide (CO₂). The roads intersections are likely to contribute significantly to the increase in traffic congestion. Using traffic lights at these points can help control traffic and reduce congestion. The timing configuration of these traffic lights is also an important factor to consider. Normally, most traffic lights control the flows at the roads intersections according to fixed time settings. However, the flows of vehicles in each one of the intersection routes do not always have the same characteristics in the course of time. In order to control the flow of vehicles at the intersections more efficiently, traffic lights need to operate dynamically, considering traffic information on each of the tracks it controls. One of the technologies used to obtain this traffic information at traffic lights is the vehicular networks. Vehicle ad hoc networks (VANETs) are a particular type of mobile ad hoc network where each vehicle is endowed with an OBU (On-Board Unit) which periodically sends information on the network. In addition, a traffic light can operate as a RSU (Road Side Unit) that allows the receipt of information sent by the OBUs. Using vehicular ad hoc networks, this master's work presents an intelligent traffic control algorithm reworked from an improvement of the best solution found in the literature so far, the ITLC (Intelligent Traffic Light Controlling). This master's work also presents a review on ITLC and 11 other solutions in the literature. The ITLC schedules platoons of vehicles, enclosed in a virtual area surrounding a traffic light to cross the intersection as their traffic characteristics. The improvements in this work focus on how vehicle platoons are formed and updated in relation to the original ITLC. Experiments were performed in a simulated synthetic environment to evaluate the performance of the improved algorithm. It was found that the mean delay of vehicles at the traffic light, using the improved algorithm, was on average 20% lower than the ITLC. The traffic flow at traffic lights was increased by 8% on the ITLC. Reductions were also observed in the average emission of CO₂ by vehicles, as well as in the average of the packets transmitted by them compared to the ITLC. In addition, experiments were simulated in a realistic crossing, located in the city of Bologna in Italy, which reaffirmed the results obtained in the synthetic scenario.

Keywords: Intelligent traffic light control. Platoons. VANET.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Principais causas de óbitos no mundo segundo a OMS. Figura adaptada de (AMBEV et al., 2017)	1
Figura 2 – Tipos de arquiteturas em redes veiculares.	6
Figura 3 – Arquitetura WAVE. Figura adaptada de (IEEE, 2014).	9
Figura 4 – Alocação de canais de rádio pela FCC para uso em DSRC (IEEE, 2014).	10
Figura 5 – Ilustração do conceito de grupo de movimentos e grupo semafórico. Figura retirada de (CONTRAN, 2014).	14
Figura 6 – Mecanismo de controle do semáforo decrementando o tempo da fase após a chegada de novos veículos. Figura retirada de (HSIEH; TSAI, 2013).	18
Figura 7 – Arquitetura do gerenciamento de semáforo baseado em VANET com o uso de pelotões veiculares. Figura retirada de (PANDIT et al., 2013).	19
Figura 8 – Área virtual do ITLC no entorno do semáforo. Figura retirada de (YOUNES; BOUKERCHE, 2016).	20
Figura 9 – Via com <i>clusters</i> utilizados no protocolo ECODE. Figura retirada de (YOUNES; BOUKERCHE, 2015).	21
Figura 10 – Opções de fases para uma interseção com 4 aproximações. Figura retirada de (GORDON; TIGHE, 2005).	26
Figura 11 – Área virtual de aptos para o ITLC-EP no entorno da interseção com semáforo.	27
Figura 12 – Distâncias envolvidas na determinação do limite da área de aptos e no tempo necessário para todos os veículos de um pelotão cruzarem a interseção.	28
Figura 13 – Interseção com quatro aproximações mostrando as 8 fases possíveis.	31
Figura 14 – Mapa do cenário em cruzamento sintético no SUMO.	37
Figura 15 – Vazão de veículos no semáforo em cruzamento sintético.	39
Figura 16 – Atraso médio dos veículos no semáforo em cruzamento sintético.	40
Figura 17 – Emissão média de CO ₂ por veículo no semáforo em cruzamento sintético.	41
Figura 18 – <i>Overhead</i> de sinalização no semáforo em cruzamento sintético.	42
Figura 19 – Cenário Andrea Costa localizado na cidade de Bolonha. Figura adaptada de (BIEKER-WALZ et al., 2015).	43
Figura 20 – Destaque da área no entorno do semáforo da cidade de Bolonha antes e após as adaptações nas vias para o funcionamento do ECODE.	44
Figura 21 – Interseção do cenário Andrea Costa mostrando as 14 fases possíveis.	45
Figura 22 – Vazão de veículos no semáforo em cruzamento realístico da cidade de Bolonha.	47

Figura 23 – Atraso médio dos veículos no semáforo em cruzamento realístico da cidade de Bolonha.	47
Figura 24 – Emissão média de CO ₂ por veículo no semáforo em cruzamento realístico da cidade de Bolonha.	48
Figura 25 – <i>Overhead</i> de sinalização no semáforo em cruzamento realístico da cidade de Bolonha.	49

Lista de tabelas

Tabela 1 – Classificação das soluções que utilizam redes veiculares em semáforos atuados pelo tráfego.	17
Tabela 2 – Comparativo entre ITLC-EP e ITLC.	33
Tabela 3 – Parâmetros de simulação utilizados com o semáforo em cruzamento sintético.	38
Tabela 4 – Diagrama de conflitos do semáforo em cruzamento sintético.	38
Tabela 5 – Relação de ganho/redução nos valores dos parâmetros de avaliação do ITLC-EP comparado ao controle de tempo fixo no cruzamento sintético.	41
Tabela 6 – Relação de ganho/redução nos valores dos parâmetros de avaliação do ITLC-EP comparado ao ITLC no cruzamento sintético.	42
Tabela 7 – Valores referentes à topologia do cenário Andrea Costa.	43
Tabela 8 – Diagrama de conflitos do semáforo em cruzamento realístico da cidade de Bolonha.	45
Tabela 9 – Parâmetros de simulação utilizados com o semáforo em cruzamento realístico da cidade de Bolonha.	46
Tabela 10 – Relação de ganho/redução nos valores dos parâmetros de avaliação do ITLC-EP comparado ao controle de tempo fixo e ao ITLC no semáforo de Bolonha.	49
Tabela 11 – Relação de ganho/redução, em valores médios, dos parâmetros de avaliação do ITLC-EP comparado ao controle de tempo fixo e ao ITLC nos cenários sintético e realístico.	50

Lista de abreviaturas e siglas

ATLC	<i>Adaptive Traffic Light Control</i>
BSS	<i>Basic Service Set</i>
CA-TLS	<i>Context-Aware Traffic Light Self-scheduling</i>
CAMs	<i>Cooperative Awareness Messages</i>
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
DSRC	<i>Dedicated Short Range Communication</i>
DT3P	<i>Dynamic Traffic-light Phase Plan Protocol</i>
ECODE	<i>Efficient COngestion DEtection</i>
EMIT	<i>EMissions from Traffic</i>
ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute</i>
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>
ITLC	<i>Intelligent Traffic Light Controlling</i>
ITLC-EP	<i>Intelligent Traffic Light Controlling - Enhanced Platoons</i>
ITS	<i>Intelligent Transportation Systems</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
LLC	<i>Logical Link Control</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
MANET	<i>Mobile Ad hoc Network</i>
OAF	<i>Oldest Arrival First</i>

OBU	<i>On-Board Unit</i>
OJF	<i>Oldest Job First</i>
OMNET++	<i>Objective Modular Network Testbed in C++</i>
OMS	Organização Mundial de Saúde
PHY	<i>Physical Layer</i>
RSU	<i>Road Side Unit</i>
SATL	<i>Self-Adaptive Traffic Light</i>
SUMO	<i>Simulation of Urban MObility</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TLPS	<i>Traffic Light Platoonig Service</i>
TraCI	<i>Traffic Control Interface</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
V2I	<i>Vehicle-to-Infrastructure</i>
V2V	<i>Vehicle-to-Vehicle</i>
VANET	<i>Vehicular Ad Hoc Network</i>
VEINS	<i>Vehicles in Network Simulation</i>
VTL	<i>Virtual Traffic Light</i>
WAVE	<i>Wireless Access in Vehicular Environments</i>
WSMP	<i>WAVE Short Message Protocol</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivos	2
1.2	Organização da Dissertação	3
2	REDES VEICULARES	5
2.1	Visão Geral	5
2.2	Principais Características e Desafios	6
2.3	Padronização da Comunicação Veicular	7
2.4	Aplicações de Redes Veiculares	9
2.5	Considerações Finais do Capítulo	11
3	CONTROLE DE SEMÁFORO COM SOLUÇÕES QUE UTILIZAM REDES VEICULARES	13
3.1	Termos Semafóricos	13
3.2	Tipos de Controle Semafórico	15
3.2.1	Controle de Tempo Fixo	15
3.2.2	Controle Atuado Pelo Tráfego	15
3.2.2.1	Semiatuado	15
3.2.2.2	Totalmente Atuado	15
3.3	Classificação das Soluções	16
3.4	Principais Soluções	17
3.4.1	<i>A Novel Traffic Light Management Mechanism on Intersection</i>	17
3.4.2	<i>Adaptive Traffic Signal Control With Vehicular Ad hoc Networks</i>	18
3.4.3	<i>Intelligent Traffic Light Controlling Algorithms Using Vehicular Networks</i>	19
3.4.4	<i>Context-Aware Traffic Light Self-Scheduling Algorithm for Intelligent Transportation Systems</i>	23
3.5	Considerações Finais do Capítulo	23
4	ALGORITMO APRIMORADO DE CONTROLE INTELIGENTE DE SEMÁFORO	25
4.1	Semáforo Isolado	25
4.2	Área Virtual de Aptos	27
4.3	Características de Tráfego de Fluxos Conflitantes	29
4.4	Algoritmo de Escalonamento ITLC-EP	30
4.5	Considerações Finais do Capítulo	33

5	AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO	35
5.1	Métricas de Avaliação	35
5.2	Semáforo em Cruzamento Sintético	36
5.3	Semáforo em Cruzamento Realístico na Cidade de Bolonha	42
5.4	Considerações Finais do Capítulo	49
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	51
	REFERÊNCIAS	53

1 Introdução

O crescente número de veículos nos grandes centros urbanos vem aumentando os congestionamentos no trânsito e, conseqüentemente, prejudicando a mobilidade urbana. Além disso, causam impactos negativos na saúde da população, na economia e no meio ambiente. Somente na cidade de São Paulo, uma pesquisa da Fundação Getúlio Vargas apontou que os congestionamentos causaram um prejuízo de mais de R\$ 40 bilhões no ano de 2012 (CINTRA, 2014). A Organização Mundial de Saúde (OMS) também relata que no ano de 2015 os acidentes de trânsito foram a 10ª maior causa global de óbitos e que, se nada de significativo for feito, a previsão é que em 2030 passem a ser o 7º maior motivo (AMBEV et al., 2017), conforme mostrado na Figura 1.

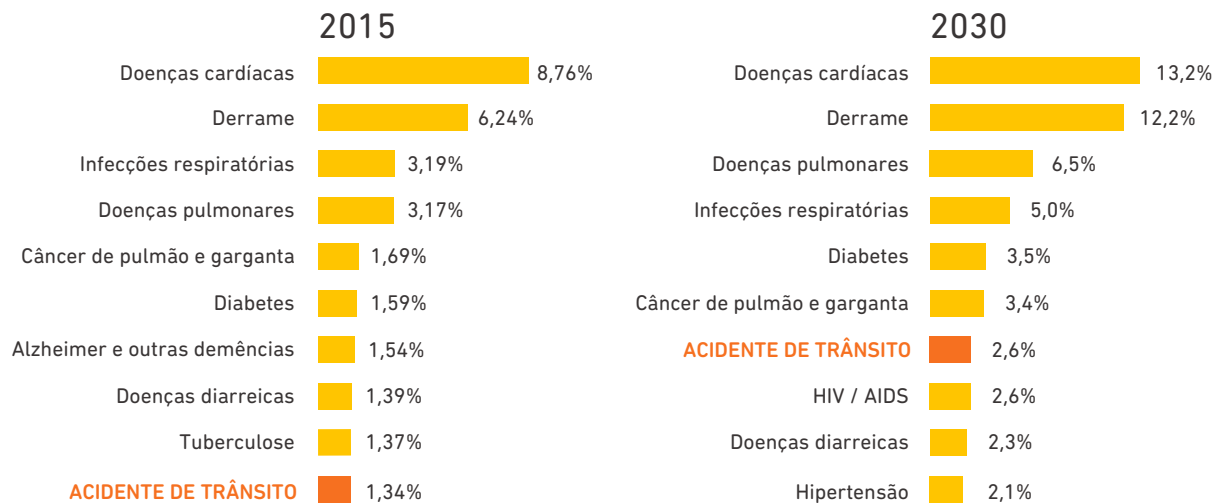


Figura 1 – Principais causas de óbitos no mundo segundo a OMS. Figura adaptada de (AMBEV et al., 2017)

Uma forma possível de reduzir esses impactos negativos é investir na melhoria da gestão do tráfego e não somente na infraestrutura convencional de transporte. Outra forma é focar nas soluções sustentáveis, como o incentivo ao uso do transporte público, e não apenas na melhoria da mobilidade (LIN; WANG; MA, 2017). Para a primeira forma, os Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS - *Intelligent Transportation Systems*) têm se apresentado como uma opção de grande potencial. Além de melhorar a mobilidade urbana, o uso de ITS também contribui indiretamente para a sustentabilidade dos sistemas de transporte, visto que boa parte de suas aplicações reduz as emissões de dióxido de carbono (CO₂) dos veículos (LEE; LAI; CHEN, 2015). Os ITS são sistemas que combinam tecnologia e melhorias em sistemas de informação, comunicação, sensores, controladores e métodos matemáticos avançados com a infraestrutura convencional de transporte. Dentre essas tecnologias, a comunicação sem fio no ambiente veicular vem ganhando destaque na comunidade científica. Esse tipo de comunicação caracteriza as redes veiculares.

As redes veiculares, conhecidas como VANETs, são redes que permitem a comunicação entre veículos e entre veículos e infraestruturas fixas localizadas às margens das vias. Seus nós apresentam alta mobilidade e trajetórias restritas às vias de circulação (ALVES et al., 2009). As VANETs permitem o desenvolvimento de aplicações interessantes para a redução de congestionamentos de trânsito e melhoria na mobilidade em vários pontos das vias urbanas.

Um desses pontos são as interseções entre as vias que são áreas onde o espaço viário é disputado por dois ou mais movimentos veiculares conflitantes. O uso de semáforos nesses pontos pode ajudar a controlar o trânsito e reduzir os congestionamentos. A configuração de temporização desses semáforos também é um fator importante a ser considerado. Em geral, a maioria dos semáforos nas interseções opera de acordo com uma configuração de tempo fixo. Entretanto, os fluxos de veículos em cada uma das vias de uma interseção não são sempre equivalentes. Como resultado, o grupo semaforico de uma das vias pode ficar vermelho quando não há nenhum veículo trafegando na outra via, ou então permanecer vermelho quando todos os veículos da outra via já tiverem passado pela interseção. Para controlar o fluxo de veículos nas interseções de forma mais eficiente, é preciso que os semáforos operem de forma dinâmica, considerando informações de tráfego em cada uma das vias que ele controla. Uma das formas dos semáforos operarem de forma dinâmica é através do uso das redes veiculares como meio para obtenção das informações de tráfego em suas vias de aproximação.

Este trabalho de mestrado apresenta uma revisão da literatura sobre as principais soluções que realizam o controle dinâmico de semáforos por meio das redes veiculares. Dentre essas soluções, o algoritmo ITLC (YOUNES; BOUKERCHE, 2016) apresenta os melhores resultados com relação à otimização do controle semaforico em dois aspectos: (i) aumento da vazão de veículos que passam pelo semáforo e (ii) redução do atraso médio dos veículos resultante da interseção sinalizada com semáforo. O foco deste trabalho de mestrado é propor um algoritmo aprimorado a partir do ITLC introduzindo melhorias em dois pontos de potencialização detectados: (i) na forma como ele agrupa os veículos que pretendem passar pela interseção (personalizando esses agrupamentos de acordo com as velocidades individuais de cada fluxo) e (ii) no modo como ele mantém informações atualizadas sobre esses agrupamentos (realizando atualizações não apenas no início, mas também durante o ciclo semaforico).

1.1 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é propor um algoritmo aprimorado de controle adaptativo de semáforo a partir da solução ITLC (YOUNES; BOUKERCHE, 2016). O ITLC apresenta os melhores resultados na literatura em termos de aumento da vazão e

redução do atraso dos veículos no semáforo.

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

1. Realizar um levantamento sobre as principais soluções para controle inteligente de semáforo que utilizam a tecnologia de redes veiculares;
2. Identificar pontos que podem ser melhorados no algoritmo ITLC e propor essas melhorias. As melhorias propostas devem potencializar o aumento da vazão de veículos no semáforo e a redução do atraso médio dos veículos;
3. Avaliar o algoritmo aprimorado proposto por meio de simulações computacionais em dois cenários: um sintético e outro realístico. O desempenho do algoritmo aprimorado deve ser comparado ao algoritmo ITLC.

1.2 Organização da Dissertação

O restante deste documento está organizado da seguinte forma.

O Capítulo 2 apresenta uma visão geral sobre as redes veiculares abordando as suas principais características e desafios. A padronização da comunicação no ambiente veicular e as classes de aplicações de redes veiculares também são apresentadas.

No Capítulo 3, temos uma descrição dos tipos de controle semafórico de tempo fixo e atuado pelo tráfego. Uma análise dos principais trabalhos da literatura para o controle de semáforo atuado pelo tráfego, com o uso de redes veiculares, também é exposta neste capítulo.

O Capítulo 4 apresenta o algoritmo aprimorado de controle adaptativo de semáforo com pelotões veiculares mais acurados. As diferenças entre ele e o ITLC são abordadas em detalhes.

O Capítulo 5 apresenta uma avaliação de desempenho que compara o algoritmo aprimorado com outros controles de semáforo. A avaliação é realizada em dois cenários distintos: um sintético e outro realista, localizado na cidade de Bolonha, na Itália.

Por fim, o Capítulo 6 discute as conclusões desta dissertação e pondera possíveis trabalhos futuros.

2 Redes Veiculares

Os Sistemas Inteligentes de Transporte são caracterizados pelo uso de tecnologias avançadas de comunicação nos meios de transporte, com a finalidade de alcançar maior segurança e mobilidade bem como reduzir o impacto ambiental causado pelos transportes. No caso do transporte rodoviário, os principais objetivos são: garantir a segurança no trânsito, agilizar e gerenciar tráfego de veículos, auxiliar os motoristas e prover aplicações de interesse aos usuários (motoristas e passageiros) (LIN; WANG; MA, 2017). Portanto, neste contexto, as redes veiculares são uma instância de ITS.

Neste capítulo são apresentados os principais aspectos das redes veiculares. A Seção 2.1 apresenta uma visão geral sobre as redes veiculares. A Seção 2.2 apresenta as principais características das redes veiculares. Na Seção 2.3, os padrões de comunicação no ambiente veicular são apresentados. Na Seção 2.4 são mostradas as classes de aplicações existentes em redes veiculares. Por fim, a Seção 2.5 faz algumas considerações finais sobre este capítulo.

2.1 Visão Geral

As Redes Veiculares, conhecidas como VANETs, são um tipo particular de rede móvel *ad hoc* (MANET - *Mobile Ad hoc Network*). Nelas os nós são veículos ou dispositivos fixos às margens das vias. A troca de informações pode ocorrer entre veículos (comunicação V2V - *Vehicle-to-Vehicle*) e entre veículos e infraestruturas localizadas às margens das vias (comunicação V2I - *Vehicle-to-Infrastructure*) (BOOYSEN; ZEADALLY; Van Rooyen, 2011).

O termo VANET, originalmente adotado para refletir a natureza *ad hoc* das redes veiculares, tem sido debatido pela comunidade científica. Isso porque a sigla enfatiza unicamente as redes *ad hoc*, no entanto, a comunicação V2I também pode estar presente (HARTENSTEIN; LABERTEAUX, 2008).

Nas VANETs, os nós veículos são dotados de dispositivos conhecidos por unidades de bordo (OBUs - *On-Board Units*) e os dispositivos fixos localizados às margens das vias são denominados unidades de acostamento (RSU - *Road Side Unit*). Esses dispositivos permitem a comunicação entre os nós de uma rede veicular e são compostos por um componente de rádio frequência, um dispositivo GPS (*Global Positioning System*), alguns sensores (velocidade, proximidade, por exemplo), uma unidade de processamento e uma memória de leitura/escrita (SAINI; ALELAIWI; SADDIK, 2015). Em geral, as RSUs hospedam e proveem serviços, enquanto as OBUs executam aplicações que utilizam

determinado serviço.

A arquitetura das redes veiculares pode ser classificada de acordo com o tipo de comunicação presente. As três principais arquiteturas são: (i) *ad hoc* puro, (ii) infraestruturada e (iii) híbrida (ALVES et al., 2009). Na arquitetura *ad hoc* puro, a comunicação ocorre apenas entre os veículos (comunicação V2V) sem qualquer RSU ou infraestrutura externa de apoio. Isso torna seu custo de implantação baixo, porém a densidade e o padrão de mobilidade dos veículos podem comprometer a conectividade da rede. Já a arquitetura infraestruturada é caracterizada pela comunicação entre veículos e RSUs (comunicação V2I). Nessa arquitetura, a presença das RSUs permite um aumento da conectividade e possibilita a comunicação com outras redes. Por outro lado, a implantação e manutenção das RSUs podem elevar os custos da rede. Na arquitetura híbrida, tem-se a presença dos dois tipos de comunicação (comunicação V2X). Utilizando uma quantidade mínima de RSUs, essa arquitetura visa aumentar a conectividade da rede sem elevar em demasia seu custo. A Figura 2 ilustra as três arquiteturas mencionadas.

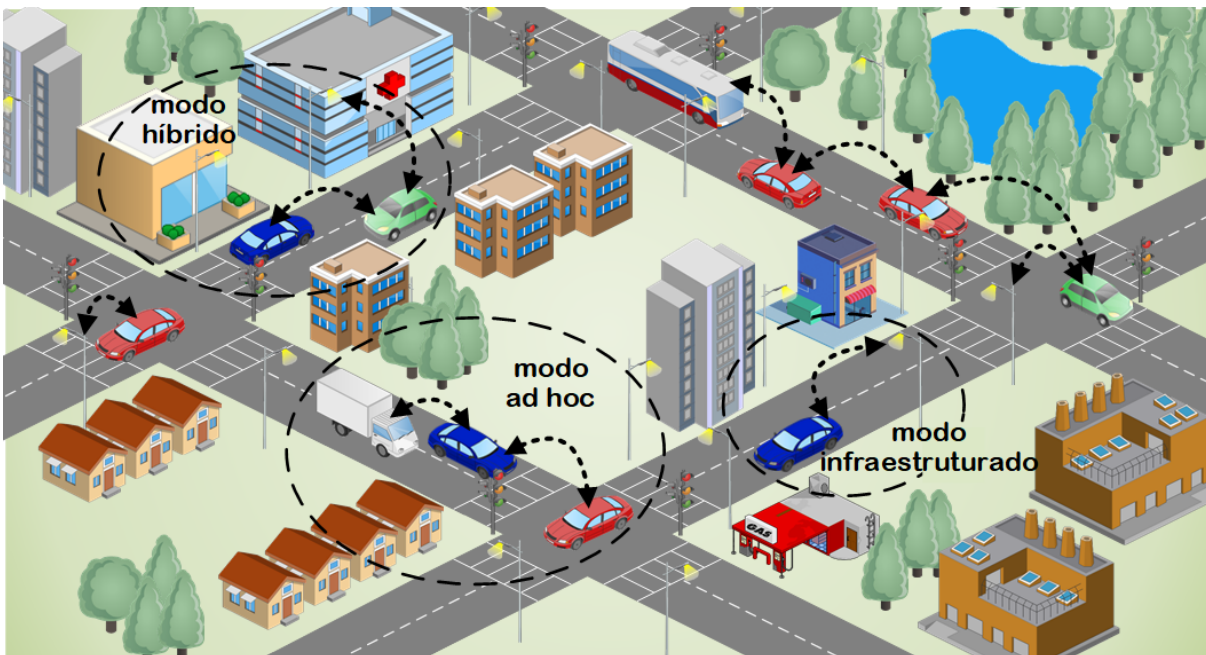


Figura 2 – Tipos de arquiteturas em redes veiculares.

2.2 Principais Características e Desafios

As redes veiculares possuem particularidades (como a alta mobilidade dos nós, por exemplo) que as tornam diferentes de outras redes. Essas particularidades influenciam diretamente no desenvolvimento de seus protocolos e serviços.

A alta mobilidade dos nós torna difícil a comunicação entre eles, pois a rede pode estar constantemente reconfigurando rotas e atualizando sua topologia. Veículos em grandes velocidades possuem tempos de conexão reduzidos que também podem dificultar, ainda

mais, a comunicação entre os nós. Apesar disso, essa mobilidade é restrita às vias de tráfego existentes e as normas de trânsito vigentes na região. Essa é uma característica que diferencia as redes veiculares das redes *ad hoc* tradicionais, onde a mobilidade é aleatória.

Outra característica está relacionada à distribuição dos nós. Em áreas com congestionamentos de veículos pode ocorrer a formação de redes densas. Essas redes densas ocasionam altas taxas de perda de pacotes devido ao grande número de colisões no meio sem fio. Por outro lado, em áreas com pouco trânsito, onde os nós podem estar muito distantes uns dos outros, pode-se ter a formação de redes esparsas. Em redes esparsas, a conectividade é reduzida por conta da formação de ilhas de conexão que dificultam a disseminação de informações.

Como em qualquer outra rede sem fio, os obstáculos também são um desafio para a comunicação em redes veiculares. Os obstáculos podem reduzir a potência do sinal recebido em uma transmissão. Além do mais, a alta mobilidade dos nós proporciona o surgimento de novos obstáculos (prédios, carros, etc.) em curtos espaços de tempo e, conseqüentemente, bloqueios e intermitências frequentes na comunicação veicular (SOMMER et al., 2011).

Quanto ao consumo de energia dos nós, não há restrições severas em redes veiculares. Os veículos possuem baterias com capacidade suficiente para as aplicações desenvolvidas, além disso, elas são recarregadas continuamente. Essa também é uma característica que diferencia as redes veiculares das redes *ad hoc* tradicionais, onde a suficiência dos recursos energéticos dos nós normalmente é um fator crítico.

O tamanho e a capacidade de carga dos nós são outros fatores relevantes a considerar. O tamanho dos veículos e suas consideráveis capacidades de carga, juntamente com seu longo tempo de vida das baterias, permitem que os nós de redes veiculares tenham uma maior capacidade de armazenamento e processamento em relação aos nós tradicionais de redes *ad hoc*.

Essas particularidades das redes veiculares, principalmente as relacionadas à alta mobilidade dos nós e ao dinamismo da rede, tornam os protocolos criados para outras redes sem fio, como as MANETs, inadequados para as VANETs (ALVES et al., 2009).

2.3 Padronização da Comunicação Veicular

Em 1999, a FCC (*Federal Communications Commission*) dos Estados Unidos alocou uma banda de 75 MHz na faixa de 5,9 GHz para DSRC (*Dedicated Short Range Communication*) de forma exclusiva para uso em ITS (FCC, 1999). Já em 2008, o Instituto europeu de Normas de Telecomunicações (ETSI) alocou uma banda de 30 MHz na mesma faixa também para ITS (ETSI, 2008).

Em 2004, o *IEEE task group p* deu início ao desenvolvimento do padrão IEEE

802.11p para ambientes veiculares. O padrão IEEE 802.11p, que é baseado no padrão 802.11a, ficou pronto em 2010 e especifica as camadas física e de controle de acesso ao meio (MAC - *Medium Access Control*). Outro grupo, *IEEE working group 1609*, assumiu a tarefa de especificar padrões adicionais que definem outras camadas superiores da pilha de protocolos. A arquitetura definida nos padrões IEEE 802.11p e IEEE 1609.x é chamada de *Wireless Access in Vehicular Environments* (WAVE) (IEEE, 2014), seu objetivo é garantir a interoperabilidade entre dispositivos (OBUs e RSUs) produzidos por diferentes fabricantes (ALVES et al., 2009). A Figura 3 apresenta a arquitetura WAVE e relaciona alguns de seus padrões, 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***

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.

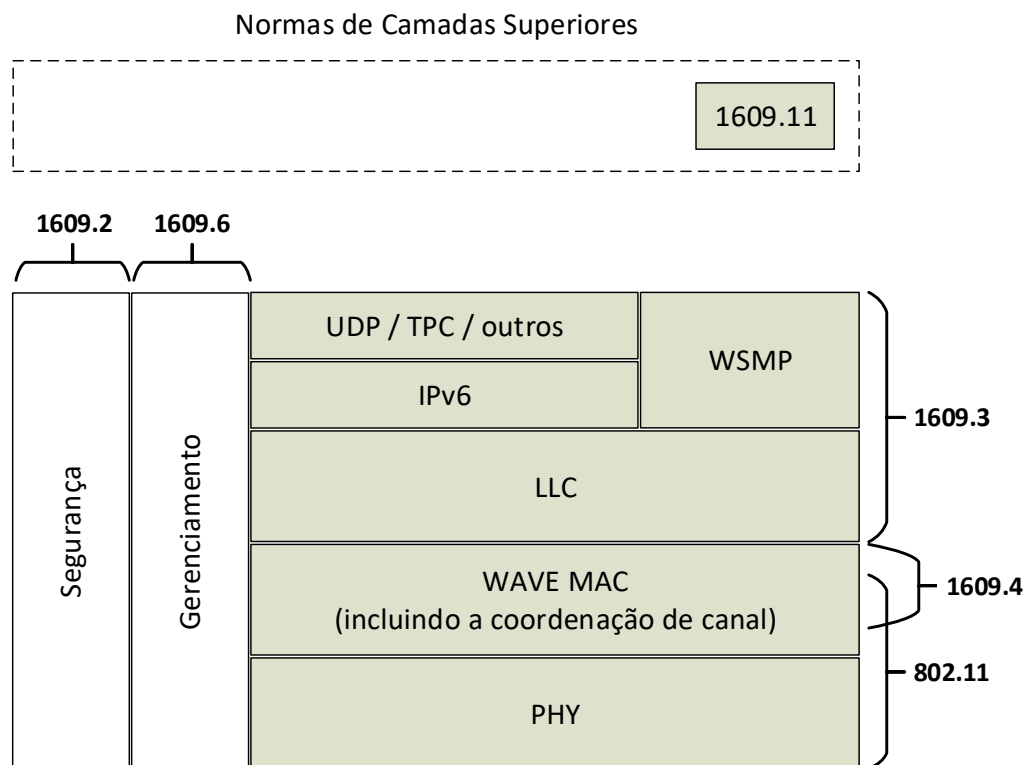


Figura 3 – Arquitetura WAVE. Figura adaptada de (IEEE, 2014).

Pode-se observar ainda na Figura 3 que o padrão IEEE 1609.3 define duas pilhas para a comunicação de dados, ambas compartilhando as mesmas camadas física e de enlace. Uma faz referência ao protocolo da internet versão 6 (IPv6) e a outra sobre o *WAVE Short Message Protocol* (WSMP). As duas pilhas são necessárias para acomodar comunicações de alta prioridade e sensíveis ao tempo, como alertas de violação de semáforo, bem como a tradicional comunicação por IP (UZCÁTEGUI; ACOSTA-MARUM, 2009).

A comunicação WAVE, na banda de 75 MHz alocada pela FCC, pode ser realizada em sete canais divididos conforme mostrado na Figura 4. São quatro canais para serviços, um canal para mensagens de controle, um canal para emergência e preservação da vida e um canal de alta potência para aplicações de segurança pública. Os canais de serviço 174 e 176, ou 180 e 182 podem ainda ser combinados para gerar dois canais de 20 MHz: 175 e 181, respectivamente.

2.4 Aplicações de Redes Veiculares

As aplicações de redes veiculares podem ser classificadas em três tipos: (i) segurança no trânsito, (ii) entretenimento e (iii) gestão e eficiência de tráfego (ALVES et al., 2009)(WANGHAM et al., 2014). As aplicações de segurança no trânsito visam divulgar rapidamente informações de caráter preventivo e emergencial. Essas informações podem

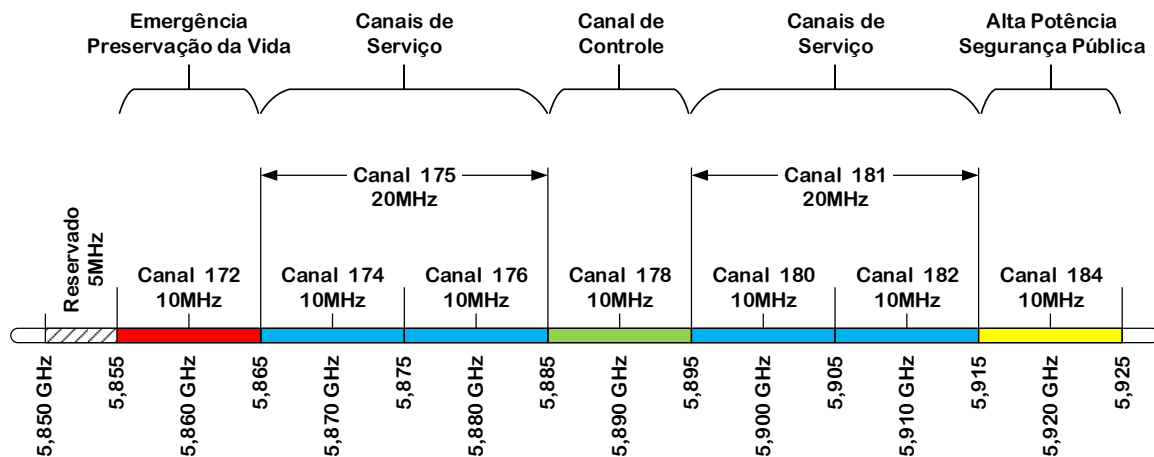


Figura 4 – Alocação de canais de rádio pela FCC para uso em DSRC (IEEE, 2014).

ser repassadas ao condutor do veículo ou utilizadas para acionar algum sistema ativo de segurança. Aplicações que alertam sobre colisões ou violação de semáforo se enquadram nessa classe. Já as aplicações de entretenimento proporcionam conforto e informação aos viajantes. Serviços de mensagens instantâneas, compartilhamento de conteúdo (músicas, filmes) e jogos são exemplos de aplicações dessa classe. Finalmente, as aplicações de gestão e eficiência de tráfego focam na melhoria dos fluxos e na assistência ao tráfego. Fazem parte dessa terceira classe aplicações que se destinam ao cálculo de melhores rotas bem como aplicações de semáforos atuados pelo tráfego.

A gestão de tráfego, especialmente nas interseções, é uma parte importante dos Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS). As aplicações que procuram otimizar os fluxos de veículos por meio do uso de semáforos atuados pelo tráfego vêm sendo bastante estudadas pela comunidade científica (ABBAS et al., 2011) (CONCEIÇÃO; FERREIRA; STEENKISTE, 2013) (HSIEH; TSAI, 2013) (PANDIT et al., 2013) (KWATIRAYO; ALMHANA; LIU, 2013b) (SHI et al., 2015) (JAGADEESH et al., 2016) (XIAO et al., 2015) (YOUNES; BOUKERCHE, 2016) (GÜNTHER et al., 2016) (YOUNES; BOUKERCHE; MAMMERI, 2016) (GAO et al., 2016) (LI; ZHANG; CHEN, 2016) (ROSYADI; WIRAYUDA; ALFARABY, 2016) (YOUNIS; MOAYERI, 2016) (HE et al., 2016). Essas aplicações levam em consideração informações sobre o tráfego nas aproximações de uma interseção para realizar a programação de temporização de um semáforo. Elas permitem que um semáforo opere com tempos variáveis dentro de limites mínimo e máximo preestabelecidos. Em contraste, um semáforo de tempo fixo permite apenas um único plano semafórico ou alguns planos específicos para atender a demanda de tráfego de períodos distintos do dia conforme análise histórica coletada previamente.

2.5 Considerações Finais do Capítulo

As redes veiculares proveem meios para melhorar a segurança no trânsito, gerenciando e agilizando o tráfego de veículos. Suas características, distintas de outras redes móveis, influenciam no desenvolvimento de protocolos e serviços para elas.

Dentre as aplicações de redes veiculares, as que tratam da gestão e eficiência de tráfego podem ser úteis para controlar o tráfego nas interseções. Semáforos, por exemplo, podem utilizar informações sobre o tráfego nas suas aproximações para realizar sua programação.

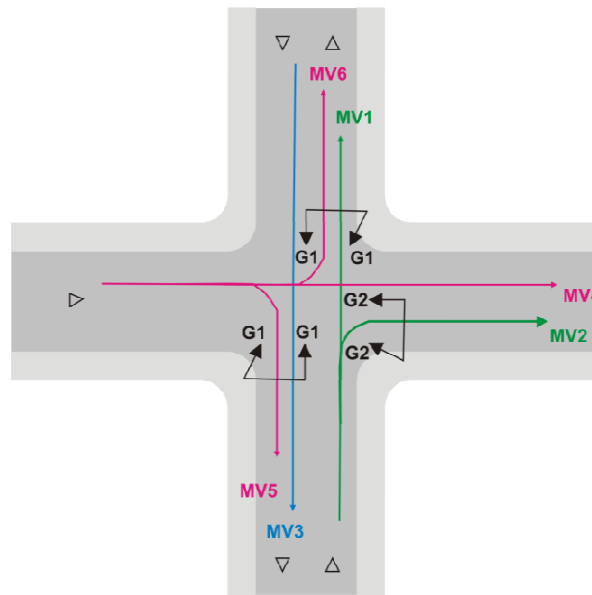
3 Controle de Semáforo com Soluções que Utilizam Redes Veiculares

Este capítulo apresenta a definição de alguns termos semafóricos na Seção 3.1 e caracteriza os tipos de controle de semáforo existentes na Seção 3.2. O capítulo também apresenta soluções que utilizam redes veiculares para o gerenciamento inteligente de semáforos atuados pelo tráfego. A Seção 3.3 classifica essas soluções de acordo com o tipo de comunicação veicular utilizada. A Seção 3.4 descreve as principais soluções encontradas dentre essas classificadas. Por fim, a Seção 3.5 apresenta considerações sobre este capítulo relacionando-o com a forma de abordagem desse trabalho de mestrado.

3.1 Termos Semafóricos

Os termos a seguir são frequentemente mencionados na definição de controle semafórico (CONTRAN, 2014):

- **Movimento.** Fluxo de veículos que têm a mesma origem e mesmo destino em uma interseção.
- **Grupo de movimentos.** Conjunto de movimentos presentes em uma mesma aproximação que recebem simultaneamente o direito de passagem. A Figura 5 mostra exemplos de grupos de movimentos.
- **Área de conflito.** Área da interseção onde os movimentos veiculares oriundos das diferentes aproximações podem interferir entre si.
- **Movimentos conflitantes.** Movimentos com origens diferentes cujas trajetórias se interceptam ou convergem em algum ponto da área de conflito.
- **Movimentos não conflitantes.** Movimentos cujas trajetórias não se interceptam nem convergem em nenhum ponto da área de conflito.
- **Diagrama de conflitos.** Representação esquemática da geometria da interseção, com a indicação de suas aproximações, sobre a qual são registrados todos os movimentos veiculares que ocorrem na área da interseção.
- **Grupo semafórico.** Conjunto de semáforos com indicações luminosas idênticas que controlam grupos de movimentos que recebem simultaneamente o direito de passagem. A Figura 5 mostra exemplos de grupos semafóricos.



Grupo de Movimentos 1: conjunto formado pelos movimentos MV1 e MV2

Grupo de Movimentos 2: conjunto formado pelo movimento MV3

Grupo de Movimentos 3: conjunto formado pelos movimentos MV4, MV5 e MV6

Grupo semafórico 1 (G1): conjunto de semáforos que controla os grupos de movimentos 1 e 2

Grupo semafórico 2 (G2): conjunto de semáforos que controla o grupo de movimentos 3

Figura 5 – Ilustração do conceito de grupo de movimentos e grupo semafórico. Figura retirada de (CONTRAN, 2014).

- **Fase.** Intervalo de tempo em que um ou mais grupos de movimentos recebem simultaneamente o direito de passagem.
- **Ciclo.** Sequência completa das fases de uma sinalização semafórica. A duração do ciclo (tempo de ciclo) em uma interseção, ou seção de via, é definida pela soma dos tempos de todas as fases programadas para o controle do tráfego no local.
- **Intervalo luminoso.** Período de tempo em que permanece inalterada a configuração luminosa dos semáforos que controlam o tráfego em um determinado local.
- **Tempo de retardo.** Tempo transcorrido entre o instante de uma detecção e o instante em que esta detecção é efetivamente considerada pelo motorista.
- **Diagrama de fases.** Representação gráfica da alocação dos movimentos que podem ser realizados em cada fase do ciclo.
- **Diagrama de intervalos luminosos.** Representação da duração e sequência dos intervalos luminosos e fases por meio de barras horizontais, associando-os aos grupos semafóricos correspondentes.
- **Plano semafórico.** Conjunto de elementos que caracteriza a programação da sinalização semafórica para uma interseção ou seção de via, num determinado período

do dia. O diagrama de fases e o de intervalos luminosos são partes integrantes do plano semafórico.

3.2 Tipos de Controle Semafórico

A sinalização semafórica proporciona basicamente dois tipos de controle. O primeiro é o controle de tempo fixo e o segundo o controle atuado pelo tráfego.

3.2.1 Controle de Tempo Fixo

O controle em tempo fixo utiliza planos semafóricos calculados com base em dados de tráfego disponíveis, obtidos por contagens volumétricas e outros levantamentos de campo. O controle pode ser efetuado com base em um único plano semafórico, ou na adoção de planos específicos para atender a demanda de tráfego histórica de períodos distintos do dia e de diferentes dias da semana.

Ao longo do período de ação de um plano semafórico, o tempo de ciclo, a sequência de fases, a duração dos intervalos luminosos e a defasagem, no caso das redes semafóricas, não sofrem alterações em suas configurações prefixadas.

3.2.2 Controle Atuado Pelo Tráfego

Os principais tipos de controle atuado pelo tráfego são: semiatuado e totalmente atuado.

3.2.2.1 Semiatuado

O controle semiatuado é, em geral, empregado em cruzamentos de vias de grande volume (vias principais) com vias de baixo volume de tráfego (vias secundárias).

Nesse tipo de controle a indicação verde é dada continuamente para os veículos da via principal, sendo interrompida quando detectores implantados nas aproximações da via secundária indicarem a presença de veículos.

3.2.2.2 Totalmente Atuado

O controle totalmente atuado decorre do monitoramento da demanda de tráfego na interseção, mediante a implantação de detectores de tráfego em todas as suas aproximações, permitindo alterações nos tempos das fases.

O princípio básico do funcionamento em modo totalmente atuado é o da determinação do tempo de verde associado a cada fase de sinalização, variando entre um valor mínimo e um valor máximo preestabelecidos.

Esse tipo de controle pode permitir o ajuste em tempo real dos valores de alguns dos parâmetros de programação, como por exemplo, a prioridade a ser dada para uma aproximação congestionada.

3.3 Classificação das Soluções

Muitas soluções vêm sendo propostas para o controle inteligente de semáforos utilizando a comunicação sem fio entre veículos (ABBAS et al., 2011) (CONCEIÇÃO; FERREIRA; STEENKISTE, 2013) (KWATIRAYO; ALMHANA; LIU, 2013b) (HSIEH; TSAI, 2013) (PANDIT et al., 2013) (XIAO et al., 2015) (SHI et al., 2015) (YOUNES; BOUKERCHE, 2016) (GÜNTHER et al., 2016) (YOUNES; BOUKERCHE; MAMMERI, 2016) (LI; ZHANG; CHEN, 2016) (YOUNIS; MOAYERI, 2016). De maneira geral, reduzir o atraso médio dos veículos no semáforo e aumentar a vazão de veículos que podem passar pela interseção são os principais objetivos da maioria desses trabalhos.

Nessas soluções o semáforo é dotado de uma RSU que recebe e analisa as informações de tráfego (velocidade, localização, direção, etc.) enviadas pelas OBU's dos veículos nas aproximações da interseção. A partir dessas informações o plano semaforico é ajustado. Ainda sobre essas informações, duas formas de programação semaforica podem ser observadas: (i) programação por análise individual de veículo e (ii) programação por análise de grupos de veículos, chamados de pelotões. Um pelotão é um grupo de veículos que viajam muito próximos uns dos outros, mantendo uma mesma velocidade consensual e distância entre os adjacentes (NEUENDORF; BRUNS, 2004) (LI et al., 2015). Os seguintes trabalhos utilizam o conceito de pelotão em suas propostas: (PANDIT et al., 2013) (YOUNES; BOUKERCHE, 2016) e (GÜNTHER et al., 2016).

A Tabela 1 sumariza as soluções encontradas e as classifica de acordo com as seguintes características:

- **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);
- **Pelotões (Pelot.):** Indica se o agrupamento de veículos é considerado na programação semaforica;
- **Cenário (Cenár.):** Especifica o tipo de cenário onde a proposta é avaliada. As opções são: simples (via com um único cruzamento) e múltiplo (via com 2 ou mais cruzamentos).

Pela Tabela 1, observa-se que as soluções que utilizam pelotões de veículos possuem uma arquitetura híbrida (comunicação V2X). Nessas soluções, além da comunicação dos

Tabela 1 – Classificação das soluções que utilizam redes veiculares em semáforos atuados pelo tráfego.

Solução	Arqui.	Pelot.	Cenár.
ITLC (YOUNES; BOUKERCHE, 2016)	V2X	Sim	Simples
TLPS (GÜNTHER et al., 2016)	V2X	Sim	Simples
CA-TLS (YOUNES; BOUKERCHE; MAMMERI, 2016)	V2X	Sim	Simples
VTL (CONCEIÇÃO; FERREIRA; STEENKISTE, 2013)	V2V	Não	Simples
SATL (LI; ZHANG; CHEN, 2016)	V2I	Não	Simples
(YOUNIS; MOAYERI, 2016)	V2I*	Não	Simples
DT3P (ABBAS et al., 2011)	V2I	Não	Simples
(HSIEH; TSAI, 2013)	V2I	Não	Simples
(XIAO et al., 2015)	V2I	Não	Simples
ATLC (KWATIRAYO; ALMHANA; LIU, 2013b)	V2I	Não	Simples
(SHI et al., 2015)	V2V	Não	Múltiplo
OAF (PANDIT et al., 2013)	V2X	Sim	Simples

* Sensores ligados ao semáforo podem substituir a comunicação V2I.

veículos com a RSU do semáforo (comunicação V2I), a comunicação V2V também está presente, principalmente no processo de formação dos pelotões. Já nas soluções onde apenas a comunicação V2V existe não há a presença física de um semáforo. Elas utilizam um semáforo virtual (*VTL - Virtual Traffic Light*) coordenado pelos veículos que estão nas aproximações da interseção.

3.4 Principais Soluções

Esta seção apresenta um resumo sobre os principais trabalhos exibidos na Seção 3.3. Os trabalhos descritos são: (i) (HSIEH; TSAI, 2013), (ii) (PANDIT et al., 2013), (iii) (YOUNES; BOUKERCHE, 2016) e (iv) (YOUNES; BOUKERCHE; MAMMERI, 2016). Os três últimos abordam o problema de controle semaforico utilizando o conceito de pelotões. Eles são os que obtém melhores resultados na redução do atraso médio dos veículos e no aumento da vazão de veículos que podem passar pela interseção.

3.4.1 A Novel Traffic Light Management Mechanism on Intersection

A solução apresentada em (HSIEH; TSAI, 2013) tem como principais objetivos a redução do tempo de espera dos veículos em sinal vermelho e o aumento da taxa de veículos que podem passar pelo cruzamento. Ela implementa um componente de armazenamento (*Storage Unit*), um analisador de mensagens (*Message Analyzer*) e um conjunto de regras (*Policy Rule*) para realizar a programação semaforica. Todos esses elementos de controle são acoplados à RSU do semáforo para tratar as informações enviadas pelas OBUs.

A Figura 6 ilustra o mecanismo de controle utilizado por esta solução. O princípio básico de funcionamento é a atribuição de tempos não nulos para cada fase do ciclo semafórico. Esses tempos são decrementados de uma unidade para cada veículo que se aproxima da interseção. Como resultado, há sempre uma priorização do tráfego na via de maior fluxo.



Figura 6 – Mecanismo de controle do semáforo decrementando o tempo da fase após a chegada de novos veículos. Figura retirada de (HSIEH; TSAI, 2013).

Os autores comparam sua solução com um semáforo de tempo fixo em dois cenários: um cruzamento com fluxos equivalentes de veículos e outro onde há um fluxo maior em uma das vias. No primeiro, o semáforo de tempo fixo apresenta veículos com tempo médio de espera bem próximos à solução proposta. Já no segundo, a solução proposta consegue uma visível redução no tempo de espera médio dos veículos em comparação ao semáforo de tempo fixo.

3.4.2 Adaptive Traffic Signal Control With Vehicular Ad hoc Networks

Um mecanismo para controle inteligente de semáforo, chamado OAF (*Oldest Arrival First*), é proposto em (PANDIT et al., 2013). A proposta formula o problema de controle de semáforo como um problema de escalonamento de tarefas em um processador, com as tarefas correspondendo a pelotões de veículos. Partindo da premissa de que as tarefas (pelotões mapeados) são todas de igual tamanho (duração), a proposta então utiliza o algoritmo OJF (*Oldest Job First*) em tempo real para realizar a programação semafórica.

O OJF concede o uso do processador (passagem pela interseção) às tarefas (pelotões) na ordem em que elas o requisitam (chegam ao semáforo). No contexto do OAF, um pelotão que chega primeiro à interseção recebe o direito de passagem primeiro. Quando chegam mais pelotões, estes são inseridos em uma fila por ordem de chegada. A Figura 7 mostra a arquitetura utilizada com o OAF destacando a RSU no semáforo e o conceito de pelotões (*platoons*).

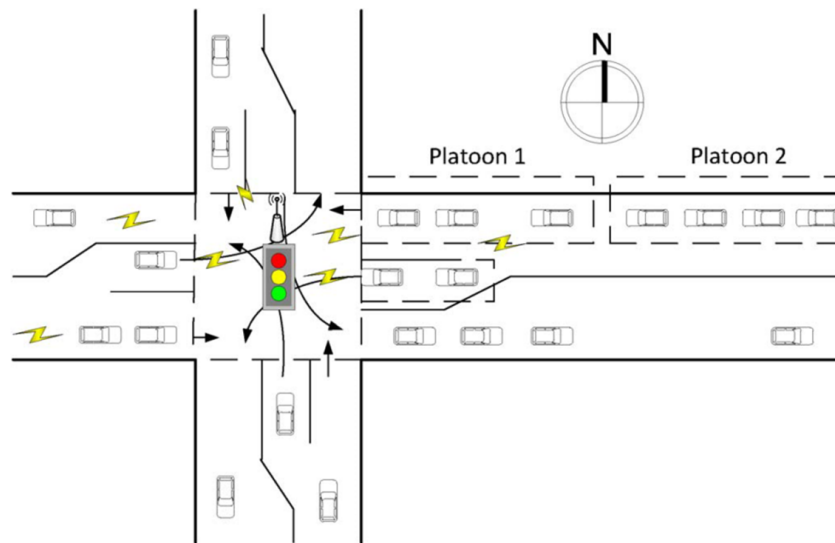


Figura 7 – Arquitetura do gerenciamento de semáforo baseado em VANET com o uso de pelotões veiculares. Figura retirada de (PANDIT et al., 2013).

A solução é comparada com outros três mecanismos de controle de semáforos: algoritmo atuado por veículo, Webster (WEBSTER; COBBE, 1966) e controle de tempo fixo. Na comparação, o OAF tem maior redução do atraso médio dos veículos em um semáforo que os outros três mecanismos. Porém, com tráfego pesado seus resultados são praticamente os mesmos do método atuado por veículos. Por fim, alternando, em pouco tempo, de um tráfego pesado para um bem mais leve, observa-se uma redução do atraso médio no OAF mais rapidamente que nos outros três métodos.

Em resumo, o OAF prioriza a passagem dos veículos que chegam primeiro ao semáforo. A priorização dada aos os pelotões que chegam primeiro reduz o atraso dos veículos, mas não garante que o semáforo trabalhe com a maior vazão possível. Isso porque o tamanho dos pelotões é definido de acordo com o tempo que eles levam para passar pela interseção e não pela quantidade de veículos que eles possuem. O OAF utiliza o mesmo tempo de verde para todos os pelotões, ou seja, não há fases com durações diferentes. Ainda sobre a vazão de veículos, ressalta-se que nenhuma avaliação foi realizada a respeito dessa métrica no trabalho.

3.4.3 Intelligent Traffic Light Controlling Algorithms Using Vehicular Networks

Em (YOUNES; BOUKERCHE, 2016) é apresentado um algoritmo de controle inteligente de semáforo chamado ITLC. O algoritmo ITLC considera as características de tráfego em tempo real para todos os fluxos que se aproximam da interseção. A Figura 8 mostra uma área virtual definida no entorno da interseção de modo que os veículos dentro dessa área são considerados como candidatos aptos a passar pela interseção.

Conforme define a Equação 3.1, a distância entre o semáforo e o limite da área de

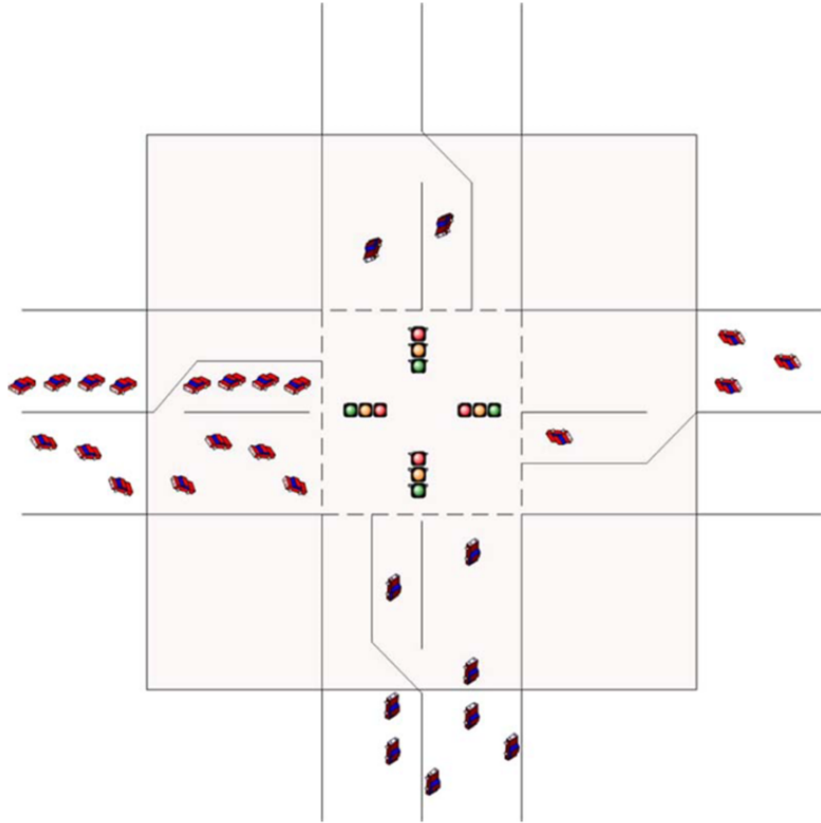


Figura 8 – Área virtual do ITLC no entorno do semáforo. Figura retirada de (YOUNES; BOUKERCHE, 2016).

aptos D_{aa} é determinada com base na velocidade média de todos os fluxos $V_{ft(i)}$ e o tempo de verde máximo T_{max} , permitido para o semáforo.

$$D_{aa} = \frac{\sum_{i=1}^n V_{ft(i)}}{n} \times T_{max} \quad (3.1)$$

Nessa área de aptos, no máximo um pelotão para cada fluxo é considerado a cada seleção de fase do ciclo semaforico. Fluxos com tráfegos mais densos são priorizados para a travessia da interseção por meio da priorização dos pelotões mais densos. Nessa proposta, os principais objetivos também são o aumento da taxa de veículos que podem passar pela interseção e a redução do atraso dos veículos por causa do semáforo.

A coleta de informações de tráfego sobre os pelotões é realizada por meio do protocolo ECODE (*Efficient COngestion DETection*) (YOUNES; BOUKERCHE, 2015). A densidade do tráfego, a velocidade do tráfego e o tempo estimado de viagem são exemplos de informações colhidas através do ECODE.

No ECODE, cada veículo colhe informações (velocidade, posição, etc.) enviadas por seus vizinhos e as armazena em uma tabela local de vizinhos T_{viz} . A via é dividida em um conjunto de *clusters* adjacentes não sobrepostos como mostrado na Figura 9. Veículos retransmissores são selecionados para avaliar o tráfego em cada *cluster* localmente

e encaminhar esses dados para os *clusters* adjacentes. Por fim, através dessa comunicação multi saltos, as informações sobre o tráfego são expandidas para a via inteira.

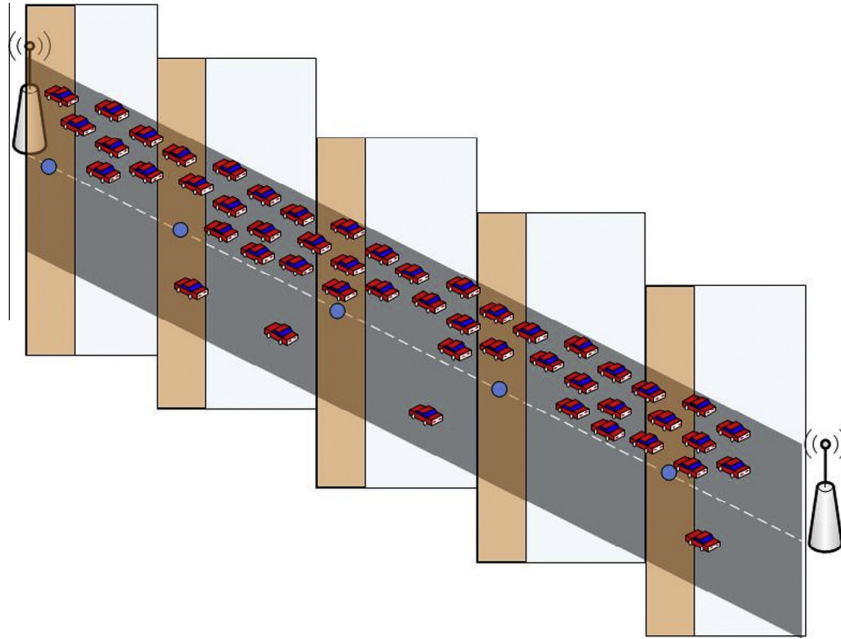


Figura 9 – Via com *clusters* utilizados no protocolo ECODE. Figura retirada de (YOUNES; BOUKERCHE, 2015).

O Algoritmo 1 mostra que o ITLC escalona os pelotões dos fluxos conflitantes começando pelo de maior densidade $D_{p(j)}$. Inicialmente, as densidades e os tempos estimados de viagem de todos os pelotões são calculados (linha 2). Dois fluxos de tráfego ($i1$ e $i2$) são candidatos a passar simultaneamente com o pelotão de mais alta densidade (linhas 5-6). O fluxo de tráfego que tiver o pelotão de maior densidade entre esses dois fluxos elegíveis é selecionado para passar na mesma fase com o pelotão de mais alta densidade.

Em seguida, assim que dois fluxos de tráfego são incluídos em cada fase, o maior tempo necessário ($T_{p(i)}$) é selecionado para a respectiva fase escalonada (linha 7 ou 10) por meio do Algoritmo 2.

O valor de $T_{p(i)}$ é determinado pelo veículo mais distante dentro da área de aptos de cada fluxo de tráfego na fase selecionada $D_{uv(i)}$, ou seja, o último veículo do pelotão, conforme definido pela Equação 3.2. A constante θ é um valor estimado para o tempo de retardo do primeiro veículo em cada pelotão.

$$T_{p(i)} = \min \left(\theta + \frac{D_{uv(i)}}{V_{p(i)}}, T_{max} \right) \quad (3.2)$$

Após a passagem de uma certa fase escalonada pela interseção, a densidade de tráfego ($D_{p(i)}$) e o tempo estimado de viagem ($T_{p(i)}$) de cada pelotão naquela fase são configurados para zero. Em seguida, o tempo estimado de viagem $T_{p(k)}$ para cada pelotão k dos fluxos subsequentes são atualizados (linha 14). Após essas atualizações, o algoritmo

Algoritmo 1: Algoritmo ITLC

Entrada: S : semáforo; AA : área de aptos; $D_{p(i)}$: densidade de tráfego do pelotão i dentro da AA ; $T_{p(i)}$: tempo necessário para todos os veículos dentro da AA , do pelotão i , cruzarem a interseção.

```

1 início
2   calcule  $D_{p(i)}$  e  $T_{p(i)}$  de todos os pelotões dentro da  $AA$ ;
3   enquanto houver pelotão com  $D_{p(i)} > 0$  faça
4     seja  $j$  o pelotão com a máxima densidade ( $D_{p(j)}$ );
5     seja  $i1$  e  $i2$  os pelotões que podem cruzar a interseção simultaneamente com o
        pelotão  $j$ ;
6     se  $D_{p(i1)} > D_{p(i2)}$  então
7        $F_{ji1} = \text{schedule}(j, i1)$ ;
8        $D_{p(i1)} = 0.0$ ;  $T_{p(i1)} = 0.0$ ;
9     senão
10       $F_{ji2} = \text{schedule}(j, i2)$ ;
11       $D_{p(i2)} = 0.0$ ;  $T_{p(i2)} = 0.0$ ;
12    fim
13     $D_{p(j)} = 0.0$ ;  $T_{p(j)} = 0.0$ ;
14    ajuste o  $T_{p(k)}$  de todos os outros pelotões dentro da  $AA$ ;
15  fim
16 fim

```

Algoritmo 2: Função schedule

Entrada: fluxos de tráfego i e j

```

1 se  $T_{p(i)} > T_{p(j)}$  então
2   retorna  $T_{p(i)}$ ;
3 senão
4   retorna  $T_{p(j)}$ ;
5 fim

```

repete o procedimento de escalonamento para todos os pelotões remanescentes de densidade não nula até todos serem escalonados.

O ITLC compara seu desempenho apenas com a solução apresentada na Seção 3.4.2, o OAF. De acordo com os autores do ITLC e do próprio OAF, o OAF é considerado como a solução que apresentava o melhor desempenho em comparação a outros mecanismos baseados em VANET propostos até aquele momento (YOUNES; BOUKERCHE, 2016) (PANDIT et al., 2013). Os resultados da comparação apontaram que o ITLC reduziu o atraso médio e aumentou a vazão do tráfego em cerca de 30% em relação ao OAF.

Há duas características no ITLC que podem ser críticas para ele: (i) a área de aptos possui limites definidos pela média da velocidade de todos os fluxos conflitantes e (ii) as densidades dos pelotões são calculadas apenas no início do ciclo semafórico.

No primeiro caso, isso pode gerar pelotões que não sejam do tamanho mais apropriado para sua velocidade de fluxo. Pelotões com tamanho menor do que deveriam podem

deixar de fora veículos que poderiam passar pela interseção, por outro lado, pelotões com tamanho maior do que deveriam podem incluir áreas sem veículos que influenciem negativamente no cálculo das densidades dos mesmos.

Já no segundo caso, é possível que o escalonamento de fases trabalhe com pelotões de densidades desatualizadas, visto que durante o ciclo não há qualquer atualização das densidades de pelotões não escalonados.

3.4.4 *Context-Aware Traffic Light Self-Scheduling Algorithm for Intelligent Transportation Systems*

A proposta apresentada em (YOUNES; BOUKERCHE; MAMMERI, 2016) tem como objetivo reduzir o atraso de veículos de emergência nas interseções com semáforos. Veículos do corpo de bombeiros ou resgate, viaturas policiais e ambulâncias são considerados como veículos de emergência pela proposta. A solução, chamada CA-TLS (*Context-Aware Traffic Light Self-Scheduling*), reprograma as fases do semáforo quando um veículo de emergência se aproxima da interseção. Uma escala de prioridades também é definida para os casos onde há dois ou mais veículos de emergência.

Para avaliar o desempenho do CA-TLS, os autores fazem uma comparação com o mecanismo apresentado na Seção 3.4.3, o ITLC (YOUNES; BOUKERCHE, 2016). Por um lado, os resultados mostram que o CA-TLS praticamente elimina o tempo de espera de veículos de emergência em semáforos. Por outro lado, ele aumenta o tempo de espera de veículos convencionais em 20% e reduz a vazão do tráfego em 30% comparado ao ITLC.

3.5 Considerações Finais do Capítulo

Com o levantamento realizado, observa-se uma grande quantidade de trabalhos publicados nos últimos anos que utilizam as redes veiculares para o gerenciamento de semáforos atuados pelo tráfego (ABBAS et al., 2011) (CONCEIÇÃO; FERREIRA; STEENKISTE, 2013) (HSIEH; TSAI, 2013) (KWATIRAYO; ALMHANA; LIU, 2013b) (PANDIT et al., 2013) (XIAO et al., 2015) (SHI et al., 2015) (YOUNES; BOUKERCHE, 2016) (GÜNTHER et al., 2016) (YOUNES; BOUKERCHE; MAMMERI, 2016) (LI; ZHANG; CHEN, 2016) (YOUNIS; MOAYERI, 2016).

Conforme apresentado na Tabela 1, apenas alguns destes trabalhos propõem formas para reduzir o atraso médio e aumentar a vazão nos semáforos utilizando o conceito de pelotão (grupo de veículos que viajam próximos uns dos outros a velocidades semelhantes). E como mostrado na Seção 3.4 as soluções que abordam o uso de pelotões são as que têm melhores resultados.

É neste contexto que se encontra o objetivo deste trabalho. Utilizando a tecnologia

das redes veiculares, é proposta uma adaptação do algoritmo ITLC (YOUNES; BOUKER-CHE, 2016). Essa adaptação tem como foco a introdução de melhorias que contornam os dois pontos críticos apresentados no final da Seção 3.4.3. Com a implementação dessas melhorias, o algoritmo aprimorado consegue reduzir o atraso médio dos veículos e aumentar a vazão do tráfego nas interseções.

4 Algoritmo Aprimorado de Controle Inteligente de Semáforo

Neste Capítulo é apresentado um aprimoramento do algoritmo ITLC (YOUNES; BOUKERCHE, 2016). A duração e a sequência das fases continuam priorizando os tráfegos mais densos, no entanto, novas estratégias de formação e atualização de pelotões são adotadas. O algoritmo aprimorado é chamado de ITLC-EP (*Intelligent Traffic Light Controlling - Enhanced Platoons*).

O algoritmo ITLC-EP considera características do tráfego de todos os fluxos de tráfegos conflitantes de uma interseção isolada. O ITLC-EP trata a interseção sinalizada como um processador compartilhado entre os fluxos de tráfego, onde dois fluxos podem ser processados juntos por vez, isto é, fluxos não conflitantes podem passar pela interseção simultaneamente. Os processos desse processador são formados pelos grupos de veículos (ou seja, os pelotões) que vão se formando em cada um dos fluxos nas aproximações do semáforo. Dessa forma, cada fluxo de tráfego pode ser considerado como um conjunto de sucessivos pelotões. Cada pelotão contém um ou mais veículos que pretendem atravessar a interseção durante uma mesma fase de verde do semáforo isolado.

As características de um semáforo isolado são apresentadas na Seção 4.1. A Seção 4.2 mostra como é definida a área virtual de aptos para o ITLC-EP. A Seção 4.3 define quais são as características de tráfegos de fluxos conflitantes consideradas pelo algoritmo. A Seção 4.4 explica o funcionamento do algoritmo ITLC-EP. Por fim, a Seção 4.5 faz algumas considerações finais sobre este capítulo.

4.1 Semáforo Isolado

Assim como ocorre no ITLC, o algoritmo ITLC-EP é definido para um semáforo isolado. Um semáforo isolado controla os movimentos de tráfego conflitantes na sua interseção de forma independente. Planos semaforicos de semáforos vizinhos nunca são considerados pelo ITLC-EP. A Figura 10 apresenta uma interseção comum nas cidades com suas quatro aproximações e opções de fases. A interseção é compartilhada entre oito grupos de movimentos de tráfego, que podem ser associados em pares para atravessar simultaneamente a interseção, isto é, sem conflito entre os movimentos de cada par.

Para um semáforo melhorar a fluidez do tráfego nas vias, as variáveis de ciclo devem ser configuradas de forma eficiente. O tempo de ciclo, a sequência e duração das fases, os intervalos luminosos são exemplos de algumas dessas variáveis. Todas as oito

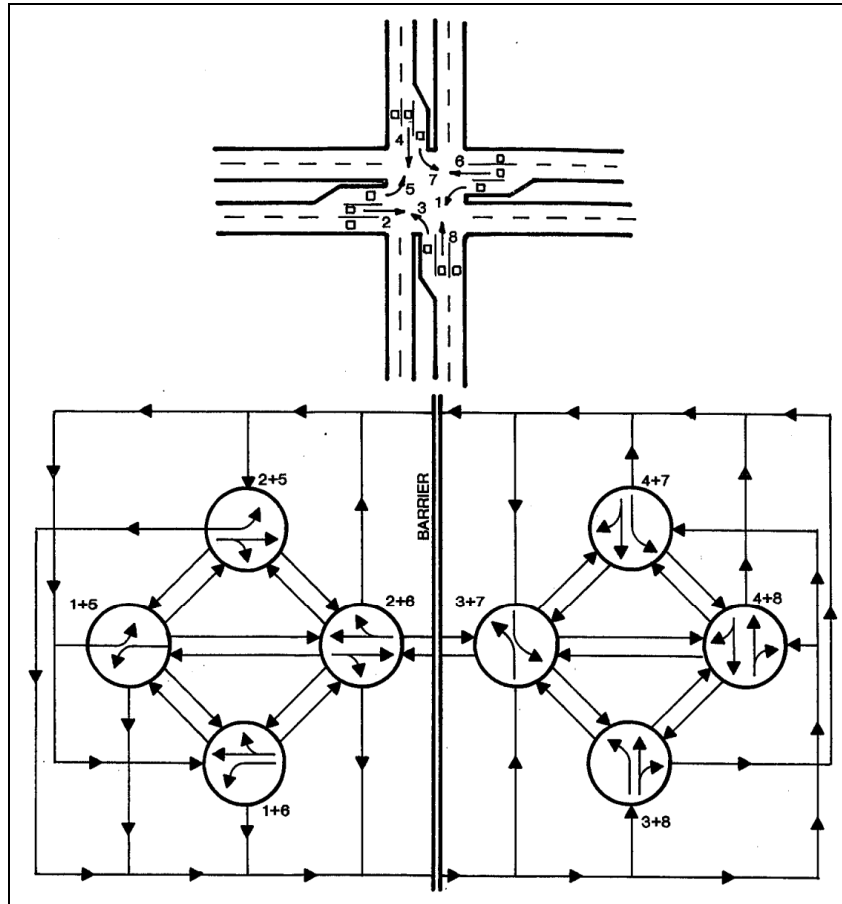


Figura 10 – Opções de fases para uma interseção com 4 aproximações. Figura retirada de (GORDON; TIGHE, 2005).

opções de fases para qualquer ciclo, da interseção comum mencionada anteriormente, são apresentadas na Figura 10. Variar a sequência das fases, a duração delas ou mesmo suprimir alguma delas são estratégias que podem ser aplicadas para melhorar a eficiência do tráfego. Algumas dessas estratégias podem ser aplicadas nos controles de tempo fixo ou atuado pelo tráfego mencionados na Seção 3.2.

A duração do tempo de verde e vermelho das fases no controle de tráfego atuado é calculada considerando alguns aspectos da interseção. A velocidade do tráfego, a capacidade da interseção, a ordem dos grupos de movimentos e o volume do tráfego de fluxos conflitantes são alguns desses aspectos. O método de Webster (WEBSTER; COBBE, 1966) é um dos mais utilizados para realização desses cálculos em controles de tempo fixo (GRADINESCU et al., 2007) (MASLEKAR et al., 2011) (KWATIRAYO; ALMHANA; LIU, 2013a) (PANDIT et al., 2013) (CONTRAN, 2014).

Características precisas do tráfego em tempo real de fluxos conflitantes são importantes para se obter o melhor escalonamento de cada semáforo. A próxima seção mostra como o ITLC-EP segmenta o tráfego dos fluxos conflitantes para uma caracterização mais precisa e posterior escalonamento.

4.2 Área Virtual de Aptos

O ITLC-EP define uma área poligonal virtual em volta da interseção com semáforo. Ela é chamada de área de aptos (AA) e contém os veículos que estão prontos para atravessar a interseção. A Figura 11 ilustra um exemplo de área de aptos em uma interseção com semáforo para o ITLC-EP.

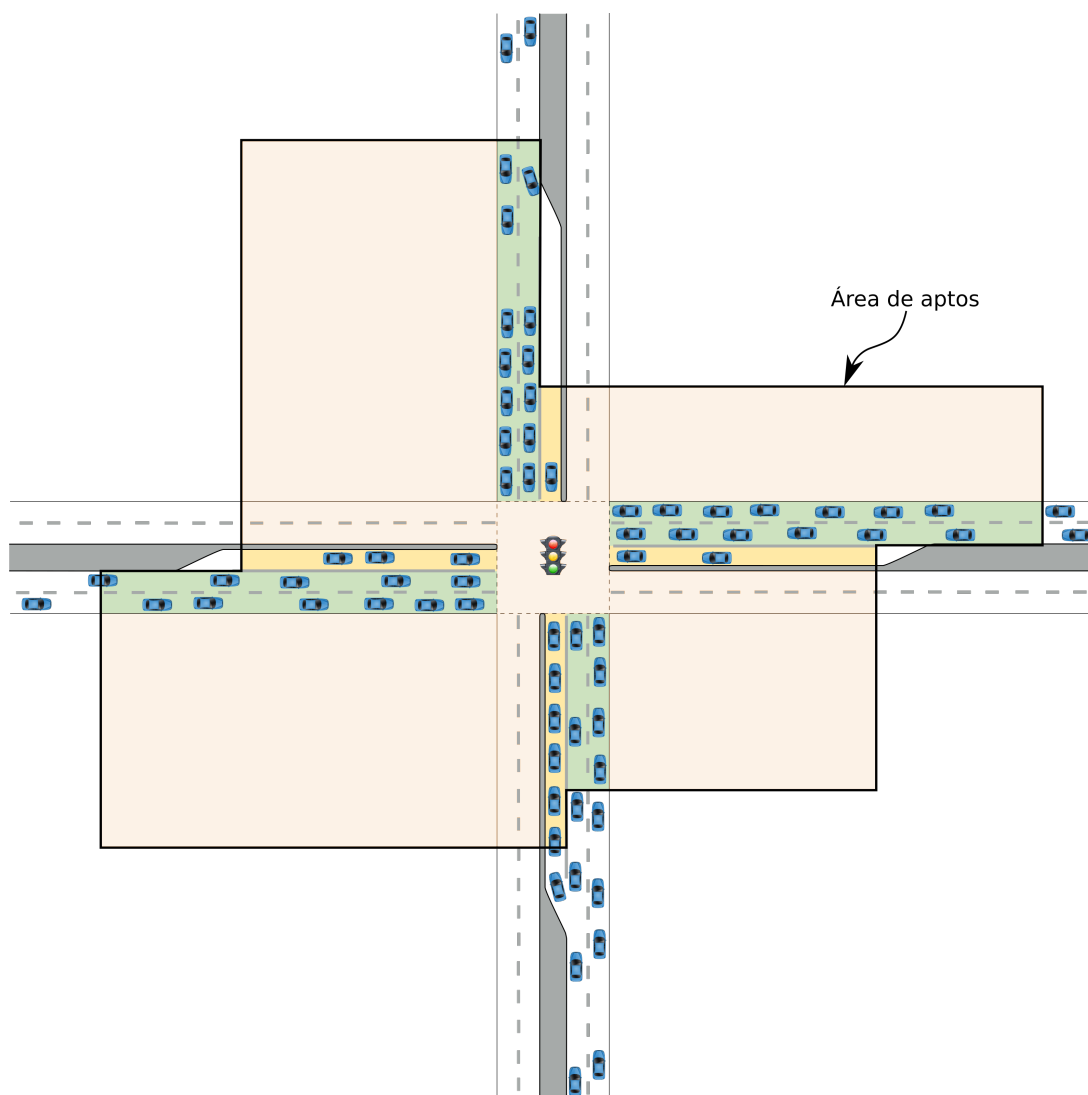


Figura 11 – Área virtual de aptos para o ITLC-EP no entorno da interseção com semáforo.

Conforme define a Equação 4.1, a distância entre o semáforo e o limite da área de aptos $D_{aa(i)}$, para cada fluxo i , é determinada com base na velocidade média do fluxo i ($V_{ft(i)}$) e o tempo de verde máximo $T_{max(i)}$, permitido para o grupo focal desse fluxo i . Se $V_{ft(i)}$ for nula em algum instante, isso significa que todos os veículos do fluxo i estão parados ou que nenhum veículo foi detectado no fluxo i e, neste caso, $D_{aa(i)}$ permanece com o último valor calculado anteriormente. Em outras palavras, não haverá alteração no

limite da área de aptos para aquele fluxo i .

$$D_{aa(i)} = V_{ft(i)} \times T_{max(i)} \quad (4.1)$$

Assim como no ITLC, a área de aptos do ITLC-EP também divide os sucessivos pelotões de cada fluxo de tráfego. Dessa forma, cada um dos fluxos de tráfego conflitantes tem uma oportunidade justa de seguir pela interseção. Quando o sinal fica vermelho para um certo fluxo de tráfego, os veículos naquele fluxo de tráfego reduzem suas velocidades e vão parando dentro da área de aptos. Em cada fluxo, todos os veículos localizados dentro da área de aptos, durante o momento da coleta de dados, são considerados como membros de um mesmo pelotão de tráfego. Todos os membros de um pelotão devem passar pela interseção na mesma fase de verde designada para o fluxo ao qual pertencem.

O período de tempo $T_{p(i)}$, necessário para todos os veículos dentro da AA , do pelotão i , cruzarem a interseção, não deve exceder o limite de tempo de verde máximo $T_{max(i)}$ do grupo focal do fluxo i onde o pelotão se encontra. Em outras palavras, todos os veículos localizados dentro da área de aptos, durante a fase de coleta de dados, devem ser capazes de atravessar a interseção, durante o tempo de verde máximo do semáforo para o fluxo correspondente. O valor de $T_{p(i)}$ é calculado pela Equação 4.2: onde θ é um valor constante estimado para o tempo de retardo do primeiro veículo em cada pelotão, $D_{uv(i)}$ é a distância entre o último veículo do pelotão e a interseção, C_{ac} é o comprimento da área de conflito (distância a ser percorrida pelos veículos na passagem pela interseção) e $V_{p(i)}$ é a velocidade média do fluxo de tráfego do pelotão. A função min é responsável por limitar a $T_{max(i)}$ o valor máximo do tempo para a fase de verde.

$$T_{p(i)} = min \left(\theta + \frac{D_{uv(i)} + C_{ac}}{V_{p(i)}}, T_{max(i)} \right) \quad (4.2)$$

A Figura 12 ilustra as distâncias relacionadas nas Equações 4.1 e 4.2 para um fluxo de uma interseção.

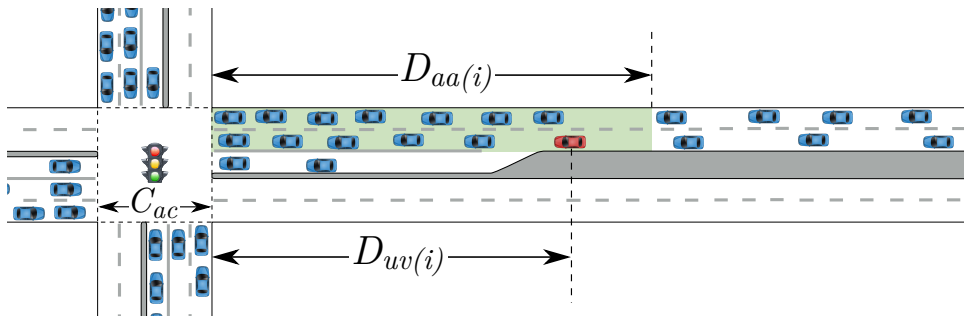


Figura 12 – Distâncias envolvidas na determinação do limite da área de aptos e no tempo necessário para todos os veículos de um pelotão cruzarem a interseção.

No algoritmo ITLC, os limites da área de aptos possuem a mesma distância para o semáforo em todos os fluxos. O tempo máximo de verde é o mesmo para todos os fluxos e a velocidade, utilizada para cálculo desses limites, é a média das velocidades de todos os fluxos conflitantes (YOUNES; BOUKERCHE, 2016). Isso resulta uma área virtual de aptos quadrada que pode truncar pelotões que poderiam ser maiores ou estender pelotões que não precisariam ser tão grandes. Por outro lado, o ITLC-EP permite uma formação de pelotões mais acurada. Isso porque os limites da área virtual de aptos são definidos de forma independente, a partir da velocidade e do tempo máximo de verde de cada fluxo.

4.3 Características de Tráfego de Fluxos Conflitantes

Para o algoritmo ITLC-EP realizar o escalonamento das fases, a RSU do semáforo coleta algumas informações enviadas pelas OBUs dos veículos localizados dentro da área de aptos. A densidade de tráfego ($D_{p(i)}$), a velocidade média de tráfego ($V_{p(i)}$) e o tempo necessário para todos os veículos dentro da AA cruzarem a interseção ($T_{p(i)}$) são calculados para cada fluxo de tráfego dentro da área de aptos (ou seja, para cada pelotão) de acordo com o protocolo ECODE (YOUNES; BOUKERCHE, 2015). Cada veículo envia periodicamente mensagens com suas informações básicas de tráfego (isto é, velocidade, localização, direção, etc.). Os veículos recebem mensagens de veículos vizinhos com informações básicas de tráfego e, então, gravam essas mensagens juntamente com a hora em que as receberam em uma tabela local T_{viz} . Além disso, cada veículo usa um mapa digital para determinar a qual fluxo de tráfego ele pertence, de acordo com as coordenadas de sua localização fornecidas pelo dispositivo de GPS de sua OBU.

Por outro lado, o semáforo anuncia periodicamente os limites da área de aptos de acordo com a velocidade média de tráfego avaliada para cada um dos fluxos conflitantes. Os veículos podem verificar se eles estão localizados dentro da área de aptos ou não depois de receberem essas mensagens com as informações sobre os limites. Então, somente os veículos localizados dentro da área de aptos utilizam os dados de tráfego, coletados dos veículos vizinhos (na tabela T_{viz}), para calcular as características de tráfego do pelotão de veículos localizados dentro dessa área para cada fluxo de tráfego.

As características de tráfego incluem o número de veículos no pelotão, a densidade do tráfego ($D_{p(i)}$), a velocidade média do tráfego ($V_{p(i)}$) e o tempo necessário para todos os veículos dentro da AA cruzarem a interseção ($T_{p(i)}$). Os veículos de cada pelotão, de forma confiante (com retransmissões e envio de pacotes em pequenos tempos aleatórios), entregam as características de tráfego de tal pelotão para o respectivo semáforo (YOUNES; BOUKERCHE, 2015) (YOUNES; BOUKERCHE, 2016). As características de tráfego de cada pelotão são utilizadas no algoritmo de escalonamento (isto é, ITLC-EP) para configurar a sequência de fases e definir o tempo para cada fase de forma eficiente.

A forma que o ITLC-EP utiliza para obter as características de tráfego de fluxos conflitantes é a mesma utilizada pelo ITLC. Ambos os algoritmos utilizam o protocolo ECODE para detectar e quantificar o tráfego dos fluxos. Esse fato é importante para assegurar uma comparação justa na avaliação de desempenho dos dois algoritmos sob o foco das melhorias implementadas. Vale ressaltar que outro protocolo poderia ser adotado, bastando para isso que ele forneça as mesmas informações de densidade do tráfego, velocidade média do tráfego e tempo necessário para atravessar a interseção presentes no ECODE.

No ECODE, os veículos transmitem suas informações básicas com o uso de *beacons* (YOUNES; BOUKERCHE, 2015). *Beacon* é um tipo especial de pacote transmitido periodicamente por todos os veículos para informar sua presença aos vizinhos. Nas redes veiculares os *beacons* também podem transmitir outras informações sobre o veículo, tais como sua velocidade atual, posição, aceleração, direção, etc. Vale ressaltar que essas informações básicas dos *beacons* podem ser inseridas nas *Cooperative Awareness Messages* (CAMs) (ETSI, 2014). 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.

4.4 Algoritmo de Escalonamento ITLC-EP

Assim como o algoritmo ITLC, o ITLC-EP escalona fases com pares de fluxos não conflitantes determinando a sequência e a duração das mesmas a cada ciclo do semáforo. Os fluxos de tráfegos mais densos continuam sendo prioritários, no entanto, além da nova estratégia de formação de pelotões mostrada na Seção 4.2, o ITLC-EP também adota uma nova estratégia para atualização dos pelotões. No ITLC-EP, as densidades dos pelotões são calculadas entre um ciclo e outro e atualizadas a cada final de escalonamento de fase.

Como exibido na Figura 10, oito pares de opções de fluxos, que podem passar simultaneamente pela interseção, estão disponíveis em cada seleção de fase: F_{15} , F_{25} , F_{16} , F_{26} , F_{37} , F_{47} , F_{38} e F_{48} . A Figura 13 mostra essas fases graficamente de acordo com o número de sequência que é usado na Figura 10 (GORDON; TIGHE, 2005). Apenas quatro dessas oito fases precisam ser selecionadas em cada ciclo do semáforo. Todos os fluxos conflitantes são escalonados por meio dessas quatro fases selecionadas. Por exemplo, se as fases F_{15} e F_{26} são escalonadas para atravessar, não será necessário escalonar as fases F_{25} e F_{16} durante aquele mesmo ciclo do semáforo porque os veículos nessas fases já foram escalonados por meio das fases escolhidas (isto é, F_{15} e F_{26}).

O escalonamento de todos os fluxos de tráfego começa pela fase que possui o pelotão com a maior densidade ($Max(D_{p(i)})$). O algoritmo ITLC-EP escalona os oito pelotões dos fluxos conflitantes começando pelo de maior densidade. O Algoritmo 3 mostra

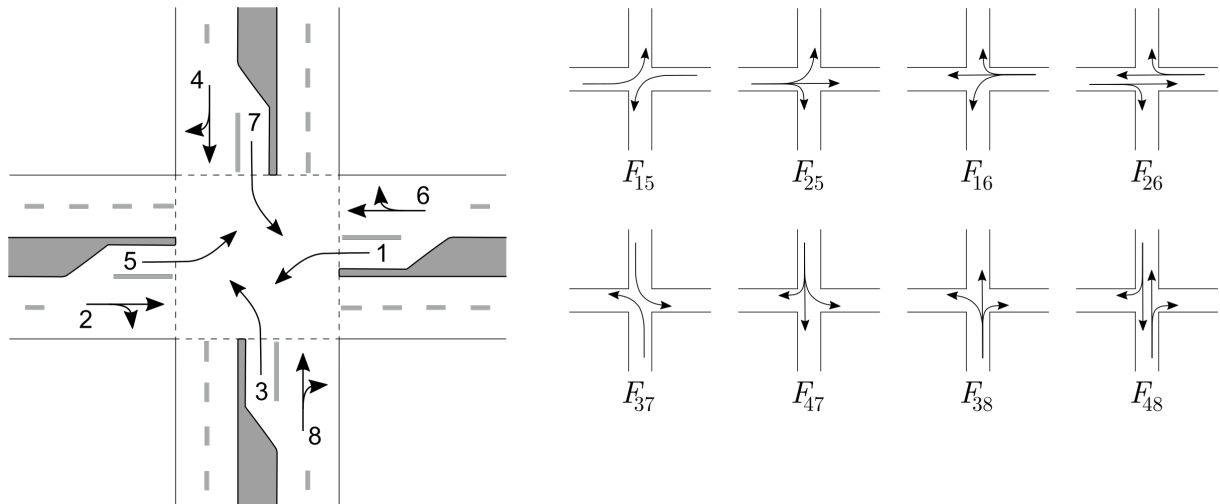


Figura 13 – Interseção com quatro aproximações mostrando as 8 fases possíveis.

como o procedimento de escalonamento é realizado. Inicialmente, as densidades e os tempos estimados de viagem de todos os pelotões são calculados e eles são marcados como pelotões não escalonados (linhas 2-3). Dois fluxos de tráfego são candidatos a passar simultaneamente com o pelotão de mais alta densidade (linhas 5-6). Por exemplo, se o fluxo de tráfego 1 tem o pelotão de maior densidade, então os pelotões dos fluxos 5 ou 6 são elegíveis para passar com fluxo 1 (isto é, F_{15} e F_{16}). O fluxo de tráfego que tiver o pelotão de maior densidade entre esses dois fluxos elegíveis é selecionado para passar na mesma fase com o pelotão de mais alta densidade (isto é, 1).

Em seguida, assim que dois fluxos de tráfego são incluídos em cada fase, o maior tempo necessário ($T_{p(i)}$) é selecionado para a respectiva fase escalonada (linha 8 ou 12). Isso porque o tempo de cada fase é determinado pelo veículo mais distante dentro da área de aptos de cada fluxo de tráfego na fase selecionada, ou seja, o último veículo do pelotão.

Depois que uma certa fase escalonada passa pela interseção, a densidade de tráfego ($D_{p(i)}$) e o tempo necessário para todos os veículos dentro da AA cruzarem a interseção ($T_{p(i)}$) de cada pelotão naquela fase são configurados para zero e, então, o pelotão é marcado como escalonado. Após isso, a densidade $D_{p(k)}$ e o tempo estimado de viagem $T_{p(k)}$ para cada pelotão k dos fluxos subsequentes são atualizados (linhas 18-19). Os valores de $D_{p(k)}$ são atualizados porque, durante a passagem pelo semáforo da fase anteriormente escalonada, é possível que novos veículos tenham entrado na área de aptos provocando uma alteração na ordem das densidades dos pelotões remanescentes. Já a atualização dos valores de $T_{p(k)}$ visa ajustá-los de acordo com a nova localização e velocidades estimadas para o último veículo em cada pelotão.

Após essas atualizações, o algoritmo repete o procedimento de escalonamento para todos os pelotões remanescentes de densidade não nula até todos serem escalonados. Para pelotões vazios são designadas densidades zero, isso elimina seus fluxos do escalonamento.

Algoritmo 3: Algoritmo ITLC-EP

Entrada: S : semáforo; AA : área de aptos; $D_{p(i)}$: densidade de tráfego do pelotão i dentro da AA ; $T_{p(i)}$: tempo necessário para todos os veículos dentro da AA , do pelotão i , cruzarem a interseção.

```

1 início
2   calcule  $D_{p(i)}$  e  $T_{p(i)}$  de todos os pelotões dentro da  $AA$ ;
3   marque todos os pelotões dentro da  $AA$  como não escalonados;
4   enquanto houver pelotão não escalonado com  $D_{p(i)} > 0$  faça
5     seja  $j$  o pelotão não escalonado com a máxima densidade ( $D_{p(j)}$ );
6     seja  $i1$  e  $i2$  os pelotões que podem cruzar a interseção simultaneamente com o
       pelotão  $j$ ;
7     se  $D_{p(i1)} > D_{p(i2)}$  então
8        $F_{ji1} = \max(T_{p(j)}, T_{p(i1)})$ ;
9        $D_{p(i1)} = 0.0$ ;  $T_{p(i1)} = 0.0$ ;
10      marque  $i1$  como escalonado;
11     senão
12        $F_{ji2} = \max(T_{p(j)}, T_{p(i2)})$ ;
13        $D_{p(i2)} = 0.0$ ;  $T_{p(i2)} = 0.0$ ;
14       marque  $i2$  como escalonado;
15     fim
16      $D_{p(j)} = 0.0$ ;  $T_{p(j)} = 0.0$ ;
17     marque  $j$  como escalonado;
18     atualize o  $D_{p(k)}$  de todos os outros pelotões não escalonados dentro da  $AA$ ;
19     ajuste o  $T_{p(k)}$  de todos os outros pelotões não escalonados dentro da  $AA$ ;
20   fim
21 fim

```

Quando todos os pelotões de densidade não nula são marcados como escalonados (isto é, quando todos os veículos, detectados dentro da área de aptos, passam pela interseção com sucesso), uma nova etapa de avaliação de tráfego dentro da área de aptos é realizada e o algoritmo de escalonamento de fases é executado repetidamente para os veículos recém chegados.

Por se tratar de um algoritmo aprimorado a partir do ITLC, o ITLC-EP herda muitas das vantagens que o ITLC traz consigo. Ele aumenta a vazão na interseção porque designa prioridades mais altas para fluxos com maior número de veículos ou com maior densidade de tráfego. Ele diminui o atraso médio dos veículos no semáforo porque, em cada ciclo, um pequeno número de veículos precisa esperar os fluxos conflitantes durante cada escalonamento de fase. Ele também diminui o atraso médio porque o tempo de escalonamento para cada fase é ajustado considerando a localização do último veículo em cada pelotão. Além disso, assim como no ITLC, nenhum veículo precisa esperar fluxos vazios porque a densidade e o tempo de escalonamento designados para esses fluxos são configurados com valor zero.

Por outro lado, no ITLC as densidades dos pelotões são calculadas apenas no

momento que antecede o início de um ciclo semafórico. Durante todo o tempo de ciclo as densidades permanecem com os mesmos valores calculados no início (YOUNES; BOUKER-CHE, 2016). Já no ITLC-EP, a atualização das densidades dos pelotões remanescentes no decorrer do ciclo semafórico, após o escalonamento de cada fase, visa manter informações mais atuais sobre essas densidades. Em um tempo de ciclo inteiro, alguns novos veículos podem entrar na área de aptos e comprometer os valores calculados antes do início do ciclo. Por exemplo, um pelotão remanescente que não era o de maior densidade, no cálculo inicial pré-ciclo, pode ter recebido mais veículos e se tornado o de maior densidade durante o tempo de ciclo. E sem a atualização que o ITLC-EP realiza, ele não seria escalonado de forma prioritária.

Uma desvantagem dessas atualizações de densidades de pelotões é que elas aumentam a quantidade de operações realizadas pelo algoritmo. Pois a cada iteração para escalonamento de fase, os pelotões remanescentes precisam ser acessados um a um para que seja feita sua atualização.

4.5 Considerações Finais do Capítulo

Este capítulo apresentou o algoritmo ITLC-EP que é uma reformulação do ITLC. Ele é projetado para um semáforo isolado, ou seja, que não considera planos semafóricos de semáforos vizinhos em sua programação. A Tabela 2 apresenta um comparativo entre ITLC-EP e ITLC destacando algumas das suas características.

Tabela 2 – Comparativo entre ITLC-EP e ITLC.

Solução	ITLC-EP	ITLC
Definido para um semáforo isolado .	Sim	Sim
Prioriza os tráfegos mais densos.	Sim	Sim
Utiliza o protocolo ECODE .	Sim	Sim
Área de aptos com limites personalizados para cada fluxo.	Sim	Não
Tempos de verde máximo personalizados para cada fluxo.	Sim	Não
Cálculo das densidades dos pelotões no início do ciclo semafórico.	Sim	Sim
Atualização das densidades dos pelotões durante o ciclo semafórico.	Sim	Não
Fluxos/pelotões sem veículos são excluídos do escalonamento.	Sim	Sim

A área virtual de aptos do ITLC-EP possui limites com distâncias que podem ser diferentes. Cada distância é calculada com base na velocidade média de cada fluxo e no tempo máximo de verde para o respectivo fluxo. Essa flexibilidade permite a formação de pelotões mais acurados (em relação à quantidade de veículos) que os formados pelo ITLC. Essa diferença na formação dos pelotões influencia no cálculo das densidades dos mesmos.

Os pelotões são escalados priorizando sempre os mais densos. O tempo mínimo necessário é concedido para a passagem de um pelotão pela interseção. Isso porque esse

tempo é calculado com base na posição e na velocidade do último veículo do pelotão. Nesse aspecto, ITLC-EP e ITLC são iguais.

Além da nova definição de área virtual, outra mudança importante do ITLC-EP ocorre na frequência de atualização das densidades dos pelotões. O ITLC-EP atualiza as densidades não só antes (como o ITLC faz), mas também durante o ciclo semafórico. Após cada escalonamento de fase do ciclo, os pelotões são atualizados de acordo com as informações do tráfego naquele instante e não apenas no início do ciclo. Isso garante que, mesmo com a chegada de novos veículos na área virtual, o algoritmo trabalhe sempre com os pelotões realmente mais densos no momento do escalonamento.

5 Avaliação de Desempenho

A análise realizada neste capítulo visa comparar o algoritmo aprimorado ITLC-EP, proposto no âmbito deste trabalho de mestrado, com a solução ITLC identificada no Capítulo 3. Adicionalmente, por ser o controle mais básico e estar presente na maioria das avaliações de desempenho dos outros trabalhos, um controle semafórico de tempo fixo também foi incluído na avaliação. A análise foi realizada por meio de simulações computacionais e as duas principais métricas avaliadas foram a vazão de veículos no semáforo e o atraso médio dos veículos no semáforo.

Para este propósito foram utilizados o simulador de rede OMNeT++ 5.3 (VARGA; HORNIG, 2008) e o simulador de tráfego e mobilidade urbana SUMO 0.32.0 (KRAJ-ZEWICZ et al., 2012). O *framework* Veins 4.7.1 (SOMMER et al., 2011), que implementa a pilha de protocolos do padrão IEEE 802.11p, foi utilizado para integrar esses dois simuladores. Ele gerencia a transferência de dados entre OMNeT++ e SUMO por meio da interface TraCI (*Traffic Control Interface*) e é amplamente utilizado no estudo de redes veiculares (NOORI, 2012)(SOUSA; SOARES, 2015)(GÜNTHER et al., 2016)(PETROV et al., 2018).

A versão do Veins (4.7.1) utilizada neste trabalho foi fundamental para a realização das simulações. A partir dessa versão, o Veins implementa um módulo de semáforo que já traz consigo uma RSU integrada. Nas versões anteriores, não havia essa integração.

A avaliação foi realizada em dois cenários distintos. O primeiro cenário, chamado de semáforo em cruzamento sintético, é apresentado na Seção 5.2. Já o segundo cenário, chamado de semáforo em cruzamento realístico, corresponde a uma região da cidade de Bolonha na Itália e é apresentado na Seção 5.3. A Seção 5.4 faz algumas considerações finais sobre este capítulo. A próxima seção sumariza as métricas de avaliação utilizadas nos dois cenários.

5.1 Métricas de Avaliação

No total, quatro métricas de avaliação foram utilizadas como parâmetros de comparação entre o ITLC, o ITLC-EP e o controle de tempo fixo. No trabalho que especifica o algoritmo ITLC apenas duas delas estão presentes: vazão de veículos no semáforo e atraso médio dos veículos (YOUNES; BOUKERCHE, 2016). Na avaliação deste trabalho de mestrado, foram acrescentadas as métricas relativas à emissão média de CO₂ e ao *overhead* de sinalização.

Detalhes sobre cada uma dessas métricas são apresentados a seguir:

- **Vazão de veículos no semáforo.** A vazão de veículos é calculada pela razão entre o total de veículos que passaram pela interseção e o tempo efetivo de operação do semáforo. Esse tempo efetivo representa a diferença entre dois instantes específicos da simulação. O primeiro instante corresponde ao momento em que o primeiro veículo inicia a passagem pelo semáforo. Já o segundo instante está associado ao momento de saída da interseção do último veículo a passar pelo semáforo.
- **Atraso médio dos veículos no semáforo.** O atraso nessa métrica visa medir o tempo de espera dos veículos em decorrência da sinalização semaforica. Esse atraso representa a diferença entre dois tempos: (i) tempo gasto por um veículo para percorrer um trecho sob o controle semaforico e (i') tempo que gastaria se percorresse o mesmo trecho em regime de fluxo ininterrupto, na velocidade máxima da via.
- **Emissão média de CO₂ por veículo.** Para calcular as taxas de emissão de CO₂ dos veículos foi utilizado o modelo EMIT (*EMISSIONS from Traffic*) integrado ao Veins. EMIT é um modelo estatístico para emissão de poluentes (CO₂, CO, HC e NO_x) e consumo de combustível instantâneos em veículos de carga leve, considerando a velocidade e a aceleração deles (CAPPIELLO et al., 2002). Mais informações sobre a implementação desse modelo de emissão no simulador Veins podem ser encontradas em (SOMMER et al., 2010).
- **Overhead de sinalização.** Essa métrica representa a quantidade média de pacotes transmitidos pelos veículos incluindo os *beacons*. Vale ressaltar que ambos os algoritmos ITLC e ITLC-EP utilizam os *beacons* para transmissão das informações de tráfego. Porém, como mencionado na Seção 4.3, mensagens CAMs poderiam ser utilizadas para esse propósito.

5.2 Semáforo em Cruzamento Sintético

O cenário com semáforo em cruzamento sintético foi modelado no simulador SUMO sob uma região de aproximadamente 1 Km². A Figura 14 apresenta o mapa deste cenário de avaliação. Ele é composto por duas vias que permitem o trânsito em ambos os sentidos. Cada aproximação do semáforo possui extensão de 500 metros, três faixas de trânsito e limite de velocidade máxima de 50 Km/h. A faixa interna é exclusiva para veículos que vão converter à esquerda e se estende apenas até uma distância de 90 metros do semáforo. Esse tipo de cenário é comumente utilizado para avaliar soluções de controle atuado pelo tráfego em interseções sinalizadas com semáforo (XIAO et al., 2015) (PANDIT et al., 2013) (YOUNES; BOUKERCHE, 2016) (YOUNES; BOUKERCHE; MAMMERI, 2016). Vale ressaltar que as conversões à direita não são livres e são permitidas apenas ao sinal verde do semáforo.

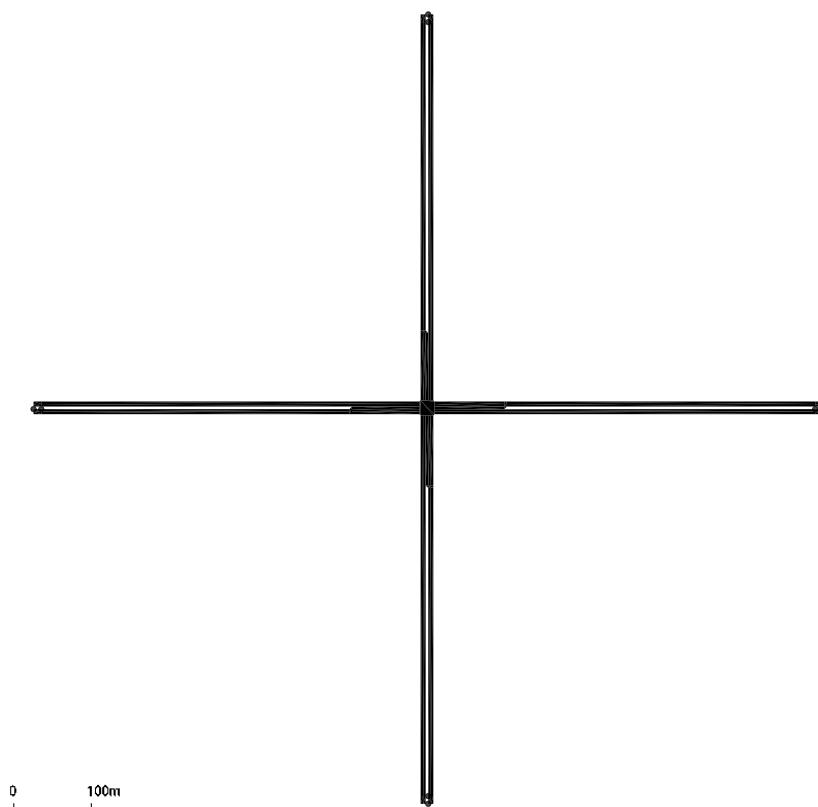


Figura 14 – Mapa do cenário em cruzamento sintético no SUMO.

A demanda de tráfego gerada no cenário segue rotas com origem no início de uma dada aproximação e destino no final das outras aproximações. Na interseção, as probabilidades do veículo converter à esquerda, seguir em frente ou converter à direita são respectivamente 0,15; 0,70 e 0,15. Essas probabilidades são as mesmas utilizadas no OAF (PANDIT et al., 2013).

Foram implementadas instâncias deste cenário com 5 demandas de tráfego diferentes. Nessas instâncias, a quantidade total de veículos destinados a passar pela interseção é de 200, 400, 600, 800 e 1000. Essa demanda de tráfego é distribuída igualmente entre cada uma das aproximações, ou seja, não há uma via com tráfego mais intenso que a outra. Cada instância foi replicada 30 vezes, totalizando 150 replicações para cada uma das soluções avaliadas. O nível de confiança para cada experimento é 95%.

A duração de cada simulação não possui um tempo fixo preestabelecido. O final da simulação ocorre no momento em que o último veículo chega ao seu destino. Cada fluxo gerado nas aproximações insere veículos na via de forma aleatória, seguindo uma probabilidade de 0,5 a cada segundo. Isso resulta em uma distribuição binomial de fluxos.

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. O modelo de propagação utilizado foi o *Two-Ray Interference* (SOMMER; DRESSLER, 2011). Detalhes sobre a implementação deste modelo no Veins podem ser encontrados em (SOMMER; JOERER; DRESSLER,

Vazão de Veículos no Semáforo

A Figura 15 apresenta a vazão de veículos no semáforo em cada uma das soluções. Em todas as demandas de tráfego o ITLC-EP obtém uma vazão superior. Em relação ao controle de tempo fixo, a vazão do ITLC-EP é maior que o dobro. Isso ocorre porque o ITLC-EP sempre prioriza os fluxos com densidade de tráfego maior, enquanto no controle de tempo fixo as condições de tráfego, em tempo real, não são levadas em consideração.

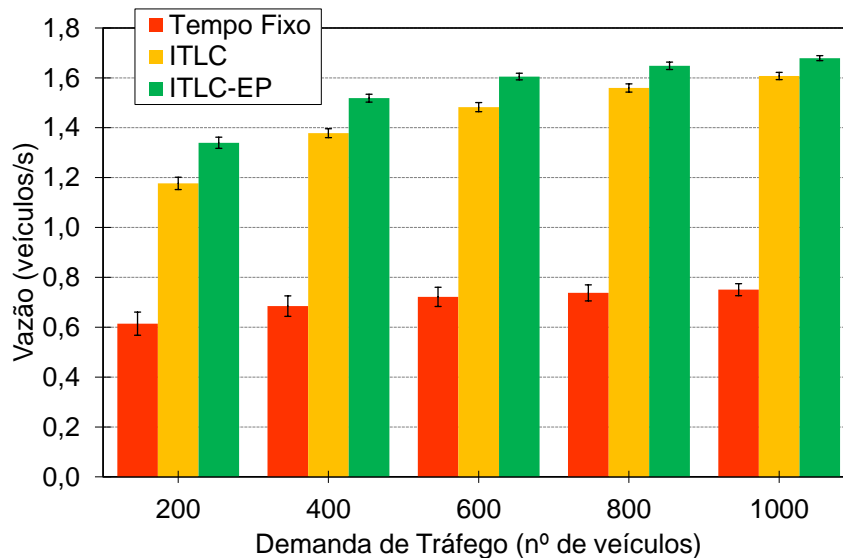


Figura 15 – Vazão de veículos no semáforo em cruzamento sintético.

Em relação ao ITLC, a vazão do ITLC-EP também é maior em todas as demandas de tráfego. Observa-se que essa superioridade fica menos acentuada conforme a demanda de tráfego se torna maior. Com 200 veículos a vazão é 13,85% maior, com 600 veículos a vazão é 8,27% maior e com a demanda de 1000 veículos o aumento da vazão é de 4,46%. Isso ocorre porque as melhorias implementadas na formação e atualização dos pelotões são mais perceptíveis em tráfegos mais dinâmicos. Conforme a demanda de tráfego aumenta, as filas de veículos nas aproximações provocam uma redução nas velocidades médias dos fluxos. De acordo com a Equação 4.1, essa redução gera limites de área de aptos menores que englobam praticamente essas filas por inteiro. Com isso, as densidades dos pelotões não sofrem alterações significativas no decorrer do ciclo, isso por conta da baixa ou inexistente entrada de novos veículos na área de aptos praticamente lotada. Em resumo, com o aumento da demanda de tráfego o comportamento do ITLC-EP vai se tornando cada vez mais próximo do comportamento do ITLC.

Atraso Médio dos Veículos no Semáforo

Conforme exposto na Figura 16, o ITLC-EP possui atraso médio dos veículos no semáforo menor que as outras duas soluções em todas as demandas de tráfego. O atraso médio dos veículos no ITLC-EP é em média 51,78% menor que na solução de controle de

tempo fixo. A priorização dos fluxos de densidade de tráfego maior faz com que menos veículos fiquem à espera no semáforo com o ITLC-EP.

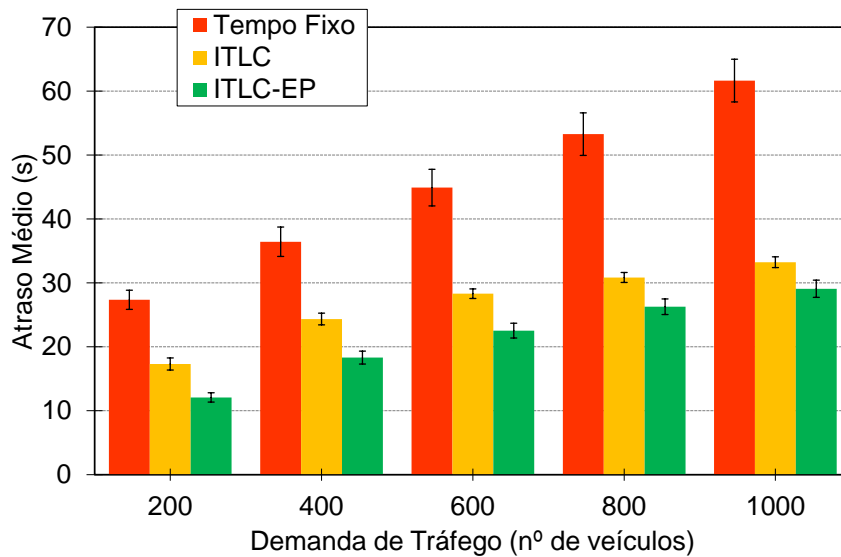


Figura 16 – Atraso médio dos veículos no semáforo em cruzamento sintético.

O atraso médio dos veículos no semáforo chega a ser 30,21% menor no ITLC-EP quando comparado ao ITLC, com uma demanda de 200 veículos. Conforme a demanda de veículos aumenta, ainda se observa uma redução, porém menos acentuada. Com uma demanda de 1000 veículos a redução é de 12,50%. Assim como no caso da avaliação da vazão, isso ocorre porque com o aumento da demanda de tráfego, as atualizações de pelotões durante o ciclo semaforico não são tão significativas. Muitos veículos vão parando dentro da área de aptos e essa vai ficando pequena para acomodar mais veículos. Em resumo, com relação ao atraso médio dos veículos no semáforo, os resultados do ITLC-EP aproximam-se aos do ITLC, conforme a demanda de tráfego vai aumentando.

Emissão Média de CO₂ por Veículo

O gráfico da Figura 17 mostra que o ITLC-EP consegue taxas de emissão média de dióxido de carbono (CO₂) menores que as outras soluções, em todas as demandas de tráfego. Com uma demanda de 1000 veículos, por exemplo, as taxas de emissão de CO₂ com o ITLC-EP chegam a ser 5,88% e 15,36% menores que o ITLC e o controle de tempo fixo, respectivamente. Isso ocorre devido ao aumento na taxa de vazão dos veículos e à redução no atraso médio dos veículos proporcionados pelo ITLC-EP. Essas melhorias tornam o tráfego mais fluido e com menos variação na aceleração dos veículos o que contribui para menores taxas de emissão de CO₂.

A Tabela 5 sumariza os ganhos ou reduções obtidas pelo ITLC-EP em relação ao controle de tempo fixo. A próxima métrica de avaliação, *overhead* de sinalização, não

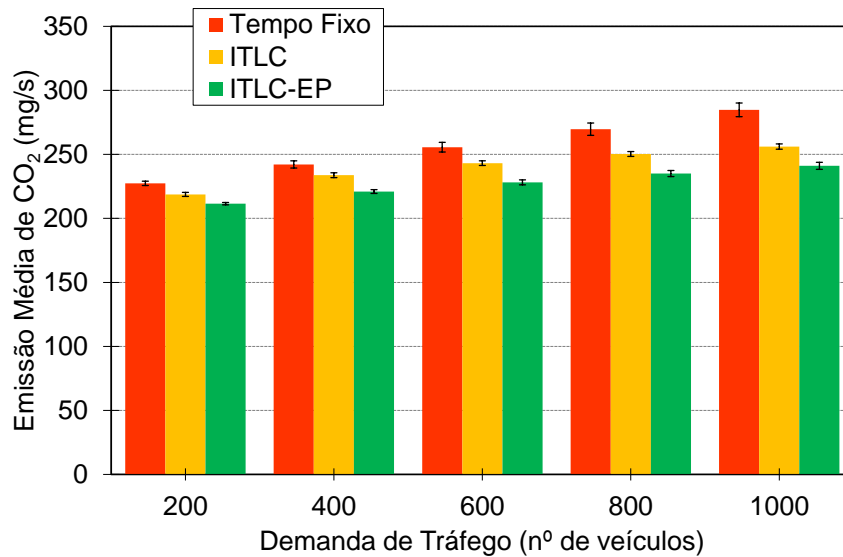


Figura 17 – Emissão média de CO₂ por veículo no semáforo em cruzamento sintético.

se aplica ao controle de tempo fixo. Apenas as outras três métricas foram avaliadas no controle de tempo fixo, já que ele não utiliza a comunicação veicular.

Tabela 5 – Relação de ganho/redução nos valores dos parâmetros de avaliação do ITLC-EP comparado ao **controle de tempo fixo** no cruzamento sintético.

Métrica de avaliação	Ganho/redução do ITLC-EP					Média
	Quantidade de veículos					
	200	400	600	800	1000	
Vazão de veículos (ganho)	118,11	121,82	122,45	123,46	123,72	121,91
Atraso médio (redução)	55,82	49,74	49,82	50,68	52,82	51,78
Emissão média de CO ₂ (redução)	6,97	8,74	10,75	12,85	15,36	10,93

(*) Valores em porcentagem.

Overhead de Sinalização

A Figura 18 mostra que o ITLC-EP obtém menores taxas médias de transmissão de pacotes por veículo que o ITLC. Isso ocorre em todas as demandas de tráfego simuladas e a redução é, em média, 11,5% menor em relação ao ITLC. Essa diferença significa que o ITLC-EP consegue fazer o semáforo dar vazão a uma mesma demanda de tráfego submetida ao ITLC, com um menor envio médio de pacotes pelos veículos. A implementação do algoritmo ITLC-EP não difere do ITLC com respeito à quantidade e à frequência de envio de pacotes. A diferença está apenas no conteúdo das mensagens responsáveis pela delimitação da área de aptos e na frequência de atualização das densidades dos pelotões, que é realizada com base nas mensagens enviadas periodicamente pelos veículos. No entanto, como os veículos que passam pela interseção, com o uso do ITLC-EP, levam menos tempo no cenário em virtude de uma maior vazão e de um menor atraso no semáforo,

ocorre então que a quantidade de pacotes enviados por eles durante o percurso torna-se menor que na solução ITLC.

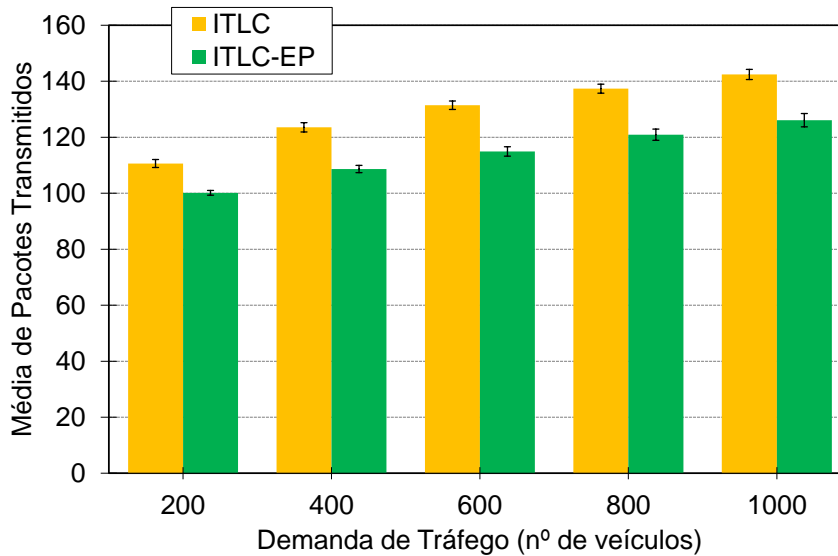


Figura 18 – *Overhead* de sinalização no semáforo em cruzamento sintético.

A Tabela 6 sumariza os ganhos ou reduções obtidas pelo ITLC-EP em relação ao ITLC para as quatro métricas avaliadas.

Tabela 6 – Relação de ganho/redução nos valores dos parâmetros de avaliação do ITLC-EP comparado ao ITLC no cruzamento sintético.

Métrica de avaliação	Ganho/redução do ITLC-EP					Média
	Quantidade de veículos					
	200	400	600	800	1000	
Vazão de veículos (ganho)	13,85	10,19	8,27	5,70	4,46	8,49
Atraso médio (redução)	30,21	24,78	20,40	14,84	12,50	20,55
Emissão média de CO ₂ (redução)	3,30	5,46	6,17	6,10	5,88	5,38
<i>Overhead</i> de sinalização (redução)	9,47	12,05	12,56	11,97	11,47	11,51

(*) Valores em porcentagem.

5.3 Semáforo em Cruzamento Realístico na Cidade de Bolonha

Foi realizado um estudo de avaliação de desempenho em um cenário realístico. O cenário escolhido, que representa uma região da cidade de Bolonha na Itália, foi desenvolvido por um grupo de pesquisa do projeto iTETRIS (RONDINONE et al., 2013). O projeto iTETRIS foi co-fundado pela Comissão Europeia em 2008 para o desenvolvimento de sistemas de avaliação, em larga escala, de soluções de gerenciamento de tráfego que utilizam comunicação veicular (KUMAR et al., 2010).

O cenário de Bolonha escolhido compreende as áreas próximas à avenida Andrea Costa, que dá nome ao mesmo. A localização do cenário Andrea Costa na cidade de

Bolonha e a representação do mapa de vias correspondente no simulador SUMO podem ser vistas na Figura 19.

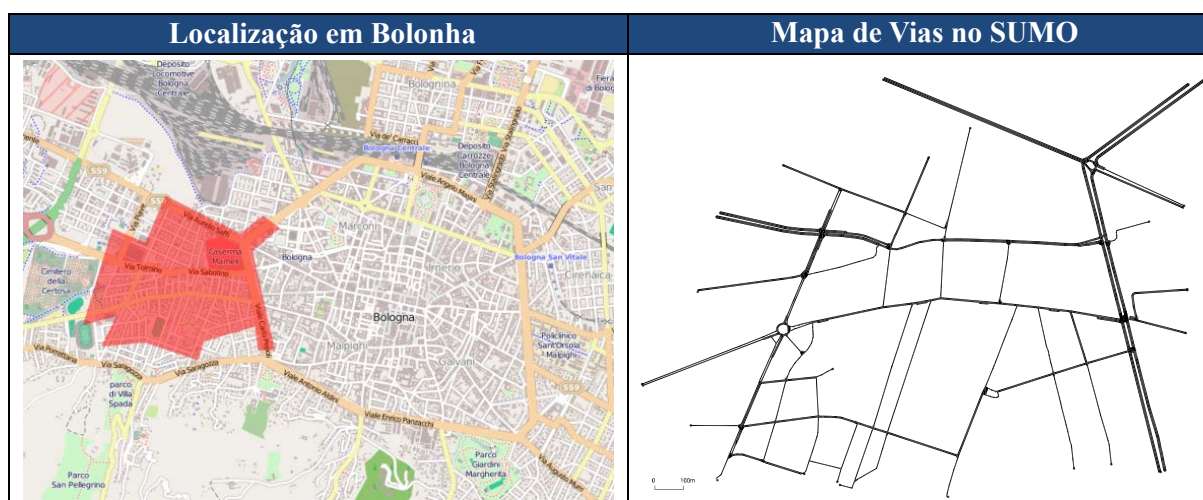


Figura 19 – Cenário Andrea Costa localizado na cidade de Bolonha. Figura adaptada de (BIEKER-WALZ et al., 2015).

O cenário Andrea Costa possui uma demanda de tráfego referente a uma hora de trânsito intenso na cidade de Bolonha, mais precisamente, entre 8 e 9 horas da manhã. Essa demanda de tráfego foi colhida, em três dias distintos da semana (terça, quarta e quinta), por 636 equipamentos de detecção localizados em pontos espalhados pela cidade. Além disso, a prefeitura de Bolonha contribuiu informando sobre o posicionamento dos semáforos e seus planos semaforicos. A Tabela 7 expõe alguns números referentes à topologia deste cenário. Mais detalhes sobre o desenvolvimento do cenário Andrea Costa podem ser encontrados em (BIEKER-WALZ et al., 2015).

Tabela 7 – Valores referentes à topologia do cenário Andrea Costa.

Parâmetro	Valor
Área	2,34 km ²
Quantidade de nós	112
Quantidade de arestas	179
Tamanho total das arestas	23,25 km
Tamanho total das faixas	34,89 km
Quantidade de semáforos	16

O tamanho pequeno do cenário Andrea Costa torna-o uma boa opção para avaliação de desempenho das soluções. Isso porque apenas a área no entorno do semáforo interessa para avaliar as soluções a partir das métricas escolhidas. E uma hora de duração de tráfego intenso também gera filas de espera significativas nas aproximações do semáforo.

Há 16 interseções sinalizadas com semáforos no cenário Andrea Costa. A interseção entre as avenidas Tolmino e Montefiorino, destacada na Figura 20(a), foi a escolhida

para realização das simulações. Ela possui 8 fluxos de tráfego conflitantes com vias que dão passagem para mais de 3600 veículos durante o tempo total de simulação disponível. Observou-se que essa quantidade de veículos varia entre 3601 e 3610 porque os veículos passam por certos pontos de decisão de rota no mapa. Os projetistas do cenário afirmam que esses pontos de decisão de rota são utilizados para reproduzir melhor a realidade nas interseções, onde o motorista pode mudar seu percurso (BIEKER-WALZ et al., 2015).

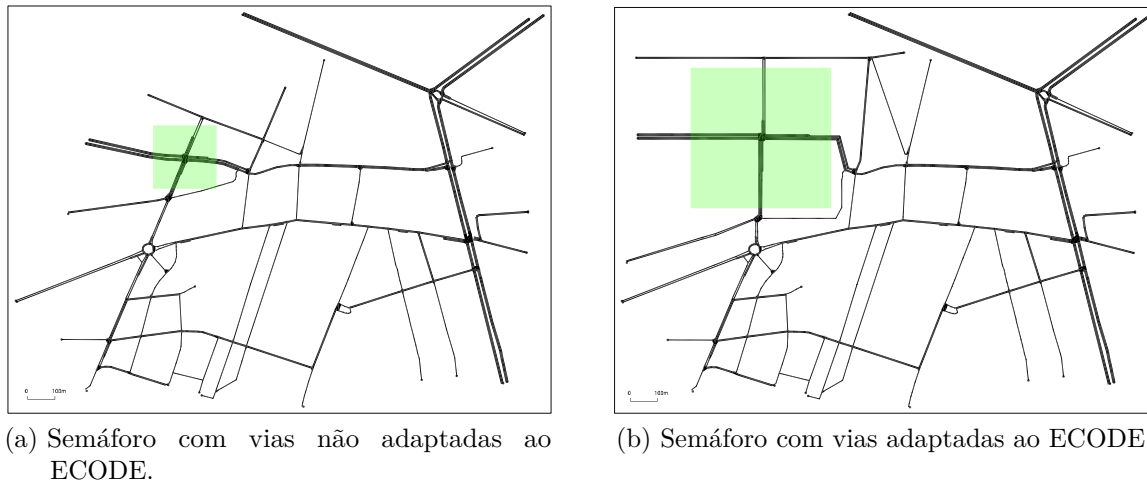


Figura 20 – Destaque da área no entorno do semáforo da cidade de Bolonha antes e após as adaptações nas vias para o funcionamento do ECODE.

A Figura 20(b) destaca como a interseção ficou após as adaptações necessárias para uso do ECODE como protocolo de detecção e quantificação do tráfego. Vale ressaltar que o ECODE foi concebido para áreas urbanas com *layouts* em grade (YOUNES; BOUKERCHE, 2015). A área destacada nessa Figura 20(b) também representa a região de interesse simulada. Com esse recorte da região de interesse, a simulação considera os veículos apenas enquanto eles passam por ela. Isso reduz o tempo computacional para realizar as simulações, pois para a avaliação de desempenho em estudo, não há interesse nos veículos em outras áreas do mapa.

A Tabela 8 mostra o diagrama de conflitos do semáforo de Bolonha em questão. Para cada fluxo, mostrado na Figura 21, há entre uma e cinco outras opções de fluxos não conflitantes que podem ser escalonados simultaneamente na mesma fase.

Os 8 fluxos de tráfego da interseção podem ser combinados em 14 fases diferentes como mostrado na Figura 21. Apenas as fases compostas por dois fluxos de tráfego foram consideradas para realização das simulações. As fases F'_{145} , F'_{245} e F'_{478} foram ignoradas porque ambos os algoritmos ITLC e ITLC-EP não realizam o escalonamento de fases com mais de dois fluxos. Para manter a avaliação de desempenho justa, essas fases com três fluxos também foram desconsideradas no controle de tempo fixo.

Os algoritmos ITLC e ITLC-EP poderiam ser modificados para incluir essas fases

Tabela 8 – Diagrama de conflitos do semáforo em cruzamento realístico da cidade de Bolonha.

Fluxo	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-	X	X				X	X
2	X	-	X				X	X
3	X	X	-	X	X	X	X	
4			X	-		X		
5			X		-	X	X	X
6			X	X	X	-	X	X
7	X	X	X		X	X	-	
8	X	X			X	X		-
Total de não conflitantes	3	3	1	5	3	2	2	3

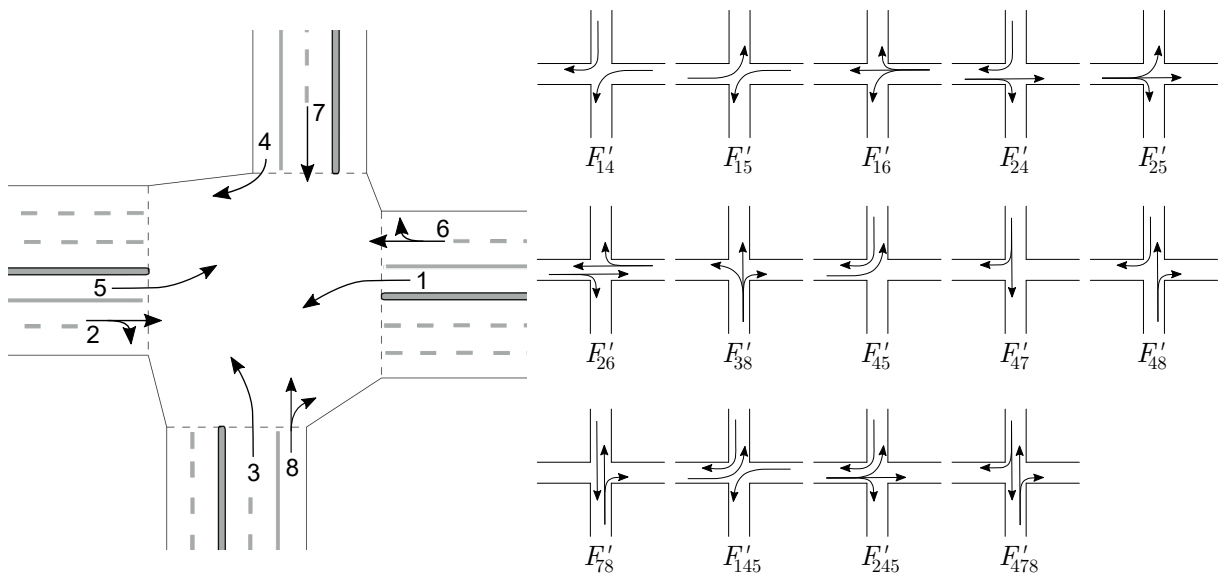


Figura 21 – Interseção do cenário Andrea Costa mostrando as 14 fases possíveis.

com mais de dois fluxos. Uma forma seria, após a definição dos dois pelotões de maior densidade, selecionar fluxos que não tenham conflitos entre si e nem com os dois fluxos de maior densidade já escolhidos. Dentre esses fluxos selecionados, apenas os que tivessem tempos de viagem estimados menores que o tempo escolhido entre os dois pelotões de maior densidade seriam escalonados juntos na mesma fase. Isso para garantir que eles pudessem passar pela interseção no tempo já concedido para os dois pelotões de maior densidade. Para preservar as características originais do ITLC e evitar distorções na avaliação, nenhum dos algoritmos foi modificado para considerar fases com mais de dois fluxos.

Cada simulação, assim como no cenário do cruzamento sintético, também não possui um tempo de duração fixo preestabelecido. O final da simulação ocorre no momento em que o último veículo sai da região de interesse.

Para cada uma das três soluções foram realizadas 30 replicações, totalizando 90 replicações. O nível de confiança para cada experimento é 95%. A Tabela 9 sumariza os principais parâmetros adotados nas simulações.

Tabela 9 – Parâmetros de simulação utilizados com o semáforo em cruzamento realístico da cidade de Bolonha.

Parâmetro	Valor
Área de simulação	0,25 Km ² (região de interesse)
Potência de transmissão	7,1 miliwatts (300 metros de alcance)
Demanda de tráfego	entre 3601 e 3610 veículos
Velocidade máxima dos veículos	50 Km/h
Frequência de transmissão de <i>beacons</i>	1 Hz

No controle de tempo fixo do semáforo de Bolonha, as fases F'_{15} , F'_{26} , F'_{38} e F'_{47} , mostradas na Figura 21, são utilizadas para compor o ciclo semaforico. Sendo de 10 segundos a duração da fase F'_{15} , 33 segundos das fases F'_{26} e F'_{38} e, por fim, 24 segundos da fase F'_{47} . Já para o semáforo operando com os algoritmos ITLC e ITLC-EP, todas as fases escalonadas possuem duração mínima de 10 segundos. Para fases escalonadas onde os fluxos 1, 4, 5 e 8 estão presentes a duração máxima é de 15 segundos. Para fases escalonadas onde os fluxos 2, 3 e 6 estão presentes a duração máxima é de 49,5 segundos. E para fases escalonadas onde o fluxo 7 está presente a duração máxima é 36 segundos. Em fases compostas por fluxos de duração máxima com tempos distintos, prevalece o tempo de duração máxima maior. Assim como no cruzamento sintético, esses tempos foram definidos de acordo com o método de Webster (WEBSTER; COBBE, 1966), seguindo as recomendações do CONTRAN (CONTRAN, 2014).

Vazão de Veículos no Semáforo de Bolonha

A Figura 22 apresenta a vazão de veículos no semáforo de Bolonha em cada uma das soluções. Observa-se que o ITLC-EP obtém uma vazão superior às outras. Em relação ao controle de tempo fixo, a vazão do ITLC-EP é quase o dobro (94,91% maior). Como no cruzamento sintético, isso ocorre por conta da priorização dos fluxos com densidade de tráfego maior garantida pelo ITLC-EP, enquanto no controle de tempo fixo o plano semaforico é predeterminado e não considera as condições de tráfego em tempo real.

Em relação ao ITLC, a vazão do ITLC-EP é 3,25% maior. Esse aumento está em conformidade com os resultados observados no cruzamento sintético. Com grandes demandas de tráfego, o ITLC-EP obtém vazões de veículos próximas às vazões do ITLC. Vale ressaltar, que a demanda de tráfego no cruzamento realístico (mais de 3600 veículos) é mais de três vezes superior a maior demanda do experimento realizado no cruzamento sintético.

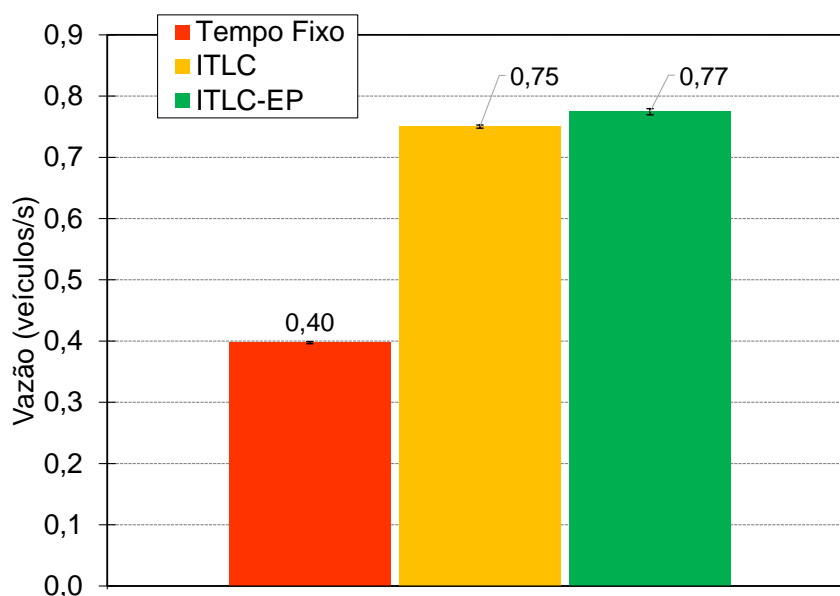


Figura 22 – Vazão de veículos no semáforo em cruzamento realístico da cidade de Bolonha.

Atraso Médio dos Veículos no Semáforo de Bolonha

De acordo com o gráfico exposto na Figura 23, o ITLC-EP possui atraso médio dos veículos no semáforo de Bolonha menor que as outras duas soluções. O atraso médio dos veículos no semáforo no ITLC-EP é 76,59% menor que na solução de controle de tempo fixo. Os fluxos com tráfegos mais densos são prioritários no ITLC-EP e, com isso, menos veículos precisam esperar para cruzar a interseção a cada ciclo, reduzindo assim o atraso médio dos veículos.

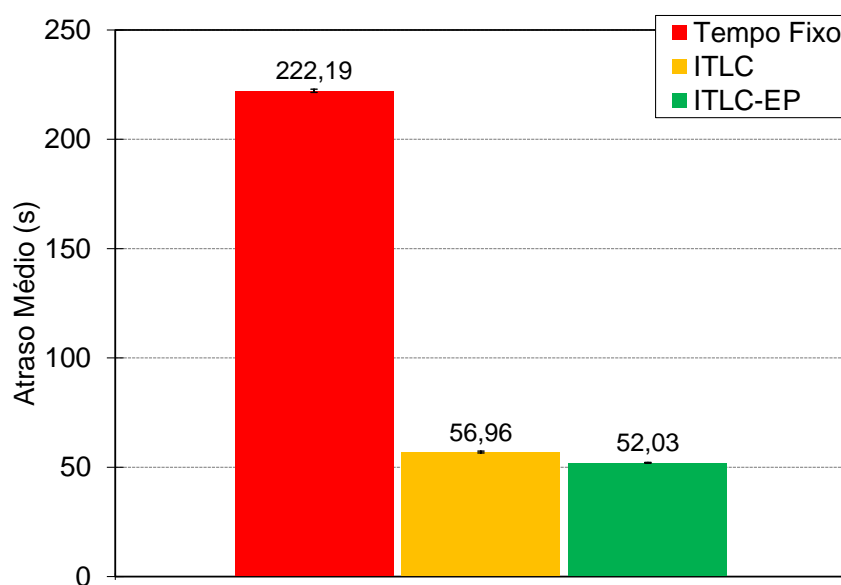


Figura 23 – Atraso médio dos veículos no semáforo em cruzamento realístico da cidade de Bolonha.

O atraso médio dos veículos no semáforo é 8,67% menor no ITLC-EP quando

comparado ao ITLC. Assim como no caso da avaliação da vazão, mas de forma menos acentuada, grandes demandas de tráfego aproximam o comportamento do ITLC-EP ao do ITLC. Como já mencionado, isso ocorre porque os pelotões pouco se alteram durante o ciclo semafórico e a área de aptos fica reduzida em decorrência da baixa velocidade dos fluxos.

Emissão Média de CO₂ por Veículo no Semáforo de Bolonha

Pela Figura 24, observa-se que o ITLC-EP obtém taxas de emissão média de dióxido de carbono (CO₂) menores que as outras soluções. As taxas de emissão de CO₂ com o ITLC-EP são 3,24% e 58,87% menores que o ITLC e o controle de tempo fixo, respectivamente. Assim como no cruzamento sintético, mais uma vez o aumento na taxa de vazão dos veículos e a redução no atraso médio dos mesmos, proporcionados pelo ITLC-EP neste experimento de Bolonha, são os responsáveis pela redução de emissão do poluente. Essas melhorias tornam o tráfego mais contínuo e com menos paradas de veículos contribuindo para a redução observada nas taxas de emissão de CO₂.

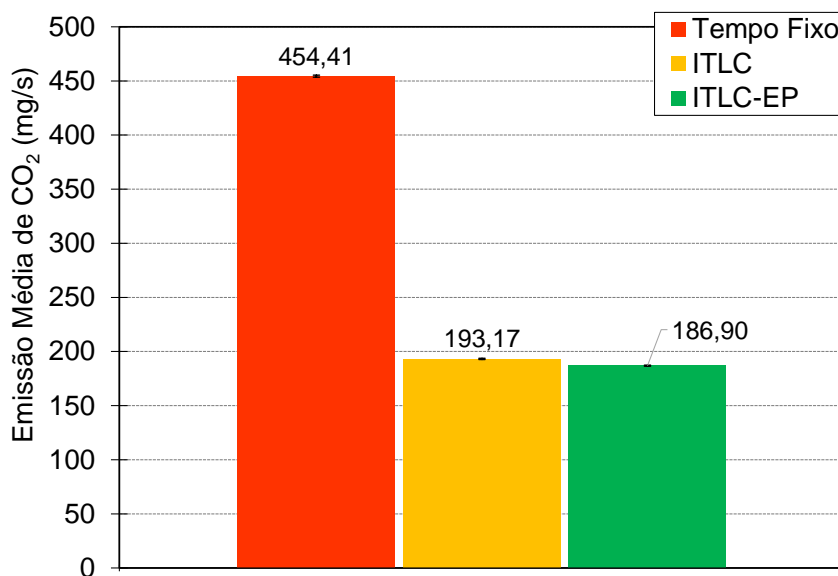


Figura 24 – Emissão média de CO₂ por veículo no semáforo em cruzamento realístico da cidade de Bolonha.

Overhead de Sinalização no Semáforo de Bolonha

O ITLC-EP obtém uma redução de 4,95% em relação ao *overhead* de sinalização obtido pelo ITLC. Esse resultado, mostrado na Figura 25, tem o mesmo significado já exposto na avaliação realizada no cruzamento sintético. Ambos os algoritmos ITLC-EP e ITLC possuem formas de envio de pacotes equivalentes em quantidade e frequência. Mas como os veículos levam menos tempo para completar seus percursos com o ITLC-EP, isso resulta em uma quantidade média menor de pacotes transmitidos pelos veículos.

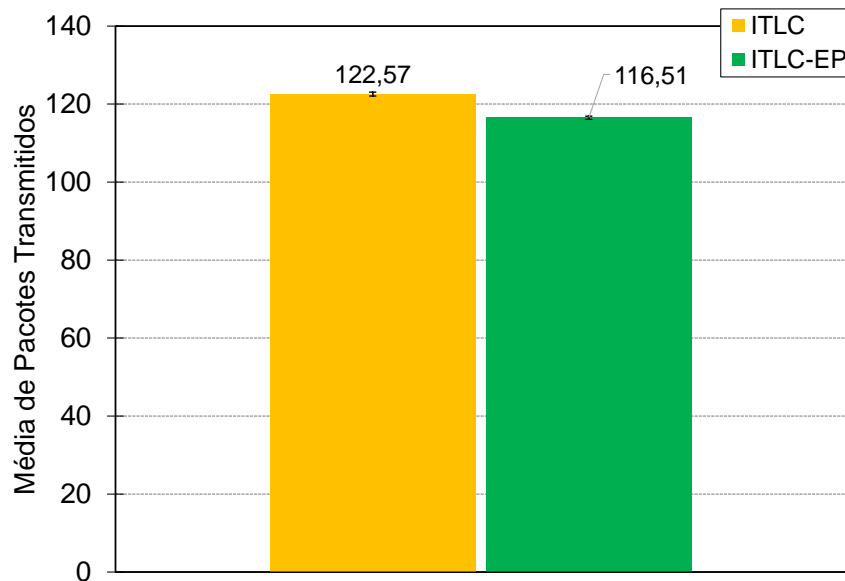


Figura 25 – *Overhead* de sinalização no semáforo em cruzamento realístico da cidade de Bolonha.

A Tabela 10 sumariza os ganhos ou reduções obtidos pelo ITLC-EP em relação ao controle de tempo fixo e ao ITLC para as quatro métricas avaliadas no cruzamento realístico da cidade de Bolonha.

Tabela 10 – Relação de ganho/redução nos valores dos parâmetros de avaliação do ITLC-EP comparado ao controle de tempo fixo e ao ITLC no semáforo de Bolonha.

Métrica de avaliação	Ganho/redução do ITLC-EP	
	Tempo fixo	ITLC
Vazão de veículos (ganho)	94,91	3,25
Atraso médio (redução)	76,59	8,67
Emissão média de CO ₂ (redução)	58,87	3,24
<i>Overhead</i> de sinalização (redução)	- - - -	4,95

(*) Valores em porcentagem.

5.4 Considerações Finais do Capítulo

Os experimentos realizados, nos cruzamentos sintético e realístico na cidade de Bolonha, mostram que as melhorias implementadas aumentam a vazão e reduzem o atraso dos veículos no semáforo. A Tabela 11 resume os ganhos ou reduções, em valores médios, obtidos pelo ITLC-EP em ambos os cenários nas métricas avaliadas.

A relação de ganho/redução no cenário sintético apresenta porcentagens maiores que no cenário realístico. Isso ocorre porque a demanda de tráfego no cenário realístico (entre 3600 e 3610 veículos) é pelo menos três vezes maior que a maior demanda do cenário

Tabela 11 – Relação de ganho/redução, em valores médios, dos parâmetros de avaliação do ITLC-EP comparado ao controle de tempo fixo e ao ITLC nos cenários sintético e realístico.

Métrica de avaliação	Ganho/redução, em média, do ITLC-EP			
	Tempo fixo		ITLC	
	Sintético	Realístico	Sintético	Realístico
Vazão de veículos (ganho)	121,91	94,91	8,49	3,25
Atraso médio (redução)	51,78	76,59	20,55	8,67
Emissão média de CO ₂ (redução)	10,93	58,87	5,38	3,24
<i>Overhead</i> de sinalização (redução)	- - - -	- - - -	11,51	4,95

(*) Valores em porcentagem.

sintético (1000 veículos). Com tráfego intenso, as melhorias implementadas no ITLC-EP tornam-se menos acentuadas.

6 Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste trabalho foi proposto um algoritmo aprimorado de controle inteligente de semáforo com pelotões veiculares mais acurados chamado ITLC-EP. O algoritmo ITLC-EP utiliza a tecnologia de redes veiculares e foi concebido a partir de melhorias introduzidas no ITLC (YOUNES; BOUKERCHE, 2016). As melhorias modificaram as etapas de formação e atualização de pelotões veiculares para ampliar tanto o aumento na vazão de veículos quanto a redução no atraso médio dos veículos no semáforo.

Foi apresentada uma revisão bibliográfica sobre as principais soluções para controle de semáforo inteligente utilizando redes veiculares. Os trabalhos foram classificados por meio das seguintes características: (i) arquitetura de comunicação utilizada (V2V, V2I ou V2X), (ii) uso ou não de pelotões veiculares e (iii) cenário de avaliação (semáforo isolado ou múltiplos semáforos).

Também foi apresentado um estudo de avaliação de desempenho no qual o algoritmo aprimorado ITLC-EP foi comparado com o ITLC e com um controle semafórico de tempo fixo. Foram utilizados dois cenários de avaliação. Um semáforo em cruzamento sintético, que é comumente utilizado para avaliar soluções de controle inteligente de semáforo (XIAO et al., 2015) (PANDIT et al., 2013) (YOUNES; BOUKERCHE, 2016) (YOUNES; BOUKERCHE; MAMMERI, 2016), e um semáforo em cruzamento realístico na cidade de Bolonha na Itália (BIEKER-WALZ et al., 2015).

No semáforo em cruzamento sintético, o ITLC-EP foi o mais eficiente em dar fluidez ao tráfego. A vazão de veículos no semáforo chegou a ser aproximadamente 13% maior que o ITLC e mais que o dobro da vazão obtida pelo controle de tempo fixo. Na avaliação do atraso médio dos veículos, houve uma redução de até 30% comparado ao ITLC e de 51% em relação ao controle de tempo fixo. O ITLC-EP também se destacou reduzindo a emissão de dióxido de carbono (CO₂) comparado aos outros dois. Além disso, com o tráfego mais fluido, os veículos gastavam menos tempo para passar pelo semáforo e, com isso, menos pacotes eram transmitidos na rede veicular, visto que ITLC e ITLC-EP possuem mecanismos equivalentes de envio de mensagens.

No semáforo em cruzamento realístico na cidade de Bolonha, a avaliação de desempenho obteve resultados que novamente validaram as melhorias introduzidas pelo ITLC-EP. A vazão aumentou cerca de 3% em relação ao ITLC e foi quase o dobro da vazão do controle de tempo fixo. O atraso médio dos veículos foi próximo de 9% comparado ao ITLC. E aqui mais uma vez foram emitidos menos poluentes e mensagens pelo ITLC-EP.

Observando o conjunto de todos os experimentos realizados, constatou-se também que conforme a demanda de tráfego aumenta, as melhorias introduzidas pelo ITLC-EP

ficam mais moderadas e a fluidez de tráfego obtida se aproxima mais dos resultados obtidos pelo ITLC. Isso ocorre porque o ITLC-EP tira proveito da (i) área de aptos mais flexível para cada fluxo de tráfego e das (ii) atualizações extras dos pelotões durante o ciclo semafórico. E com grandes demandas de tráfego, a velocidade muito baixa ou nula dos fluxos e a saturação de veículos na via atenuam os efeitos de (i) e (ii), respectivamente.

Ainda sobre os resultados obtidos com grandes demandas de tráfego, vale ressaltar que nos centros urbanos a maior parte do tempo a situação é de tráfego mediano. Isso significa que na maior parte do tempo o ITLC-EP levaria uma vantagem considerável em relação ao ITLC, ganhando pouco apenas nos poucos horários de pico.

Como trabalhos futuros, pretende-se realizar um estudo do ITLC-EP atuando em cenários com diferentes níveis de penetração. O propósito é avaliar a solução com quantidades críticas de veículos equipados com a tecnologia VANET. Também pretende-se avaliar novamente a solução no cenário de Bolonha, discretizando os valores das métricas ao longo do tempo de simulação disponível.

Ainda como trabalhos futuros, planeja-se adaptar o algoritmo ITLC-EP para trabalhar em vias arteriais com múltiplos semáforos coordenados entre si. Além disso, deseja-se realizar um estudo de avaliação de desempenho desse ITLC-EP adaptado com outras soluções que também sejam voltadas para o controle de múltiplos semáforos em vias arteriais.

Referências

- ABBAS, M. K. et al. Traffic light control via VANET system architecture. *2011 IEEE Symposium on Wireless Technology and Applications (ISWTA)*, p. 174–179, 2011. Citado 4 vezes nas páginas 10, 16, 17 e 23.
- ALVES, R. d. S. et al. Redes Veiculares: Princípios, Aplicações e Desafios. *Minicursos do Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores - SBRC 2009*, p. 199–254, 2009. Disponível em: <<http://www.gta.ufrj.br/ftp/gta/TechReports/ACC09.pdf>>. Citado 5 vezes nas páginas 2, 6, 7, 8 e 9.
- AMBEV et al. Retrato da Segurança Viária 2017. p. 1–104, 2017. Disponível em: <https://www.ambev.com.br/conteudo/uploads/2017/09/Retrato-da-Seguran{ç}a-Vi{á}ria__Am>. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 1.
- BIEKER-WALZ, L. et al. Traffic Simulation for All: A Real World Traffic Scenario from the City of Bologna. *Lecture Notes in Control and Information Sciences*, v. 13, p. 47–60, 2015. Citado 4 vezes nas páginas 11, 43, 44 e 51.
- BOOYSEN, M. J.; ZEDADALLY, S.; Van Rooyen, G. J. Survey of media access control protocols for vehicular ad hoc networks. *IET Communications*, v. 5, n. 11, p. 1619, 2011. ISSN 17518628. Disponível em: <<http://link.aip.org/link/ICEOCW/v5/i11/p1619/s1&Agg=doi>>. Citado na página 5.
- CAPPIELLO, A. et al. A statistical model of vehicle emissions and fuel consumption. In: *Proceedings. The IEEE 5th International Conference on Intelligent Transportation Systems*. [S.l.: s.n.], 2002. p. 801–809. Citado na página 36.
- CINTRA, M. Os Custos dos Congestionamentos na Cidade de São Paulo. *FGV - Escola de Economia de São Paulo*, p. 35, 2014. Disponível em: <<http://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/handle/10438/11576>>. Citado na página 1.
- CONCEIÇÃO, H.; FERREIRA, M.; STEENKISTE, P. Virtual traffic lights in partial deployment scenarios. *2013 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, n. IV, p. 988–993, 2013. Citado 4 vezes nas páginas 10, 16, 17 e 23.
- CONTRAN. Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito Volume V - Sinalização Semafórica. *Conselho Nacional de Trânsito*, V, 2014. Citado 6 vezes nas páginas 11, 13, 14, 26, 38 e 46.
- 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*. 2008. 1–3 p. Disponível em: <<http://www.etsi.org/index.php/news-events/news/226-press-release-30th-september-2008>>. Citado na página 7.
- ETSI. Intelligent Transport Systems (ITS) - Vehicular Communications - Basic Set of Applications - Part 2 : Specification of Cooperative Awareness Basic Service. *History*, n. ETSI EN 302 637-2 V1.3.2, p. (2014–11), 2014. Citado na página 30.

- FCC. *FCC Allocates Spectrum in 5.9 GHz Range for Intelligent Transportation Systems Uses*. 1999. Disponível em: <https://transition.fcc.gov/Bureaus/Engineering_Technology/News_Releases/1999/nret9006.html>. Citado na página 7.
- GAO, K. et al. Discrete Harmony Search Algorithm for Solving Urban Traffic Light Scheduling Problem *. *2016 American Control Conference (ACC)*, p. 6239–6244, 2016. Citado na página 10.
- GORDON, R.; TIGHE, W. Traffic Control Systems Handbook. *Federal Highway Administration*, n. October, p. 1–367, 2005. Citado 3 vezes nas páginas 11, 26 e 30.
- GRADINESCU, V. et al. Adaptive Traffic Lights Using Car-to-Car Communication. In: *2007 IEEE 65th Vehicular Technology Conference - VTC2007-Spring*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 21–25. ISSN 1550-2252. Citado na página 26.
- GÜNTHER, H.-J. et al. Platooning at Traffic Lights A microscopic simulation study. *2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, n. IV, p. 1047–1053, 2016. Citado 5 vezes nas páginas 10, 16, 17, 23 e 35.
- HARTENSTEIN, H.; LABERTEAUX, K. P. A Tutorial Survey on Vehicular Ad Hoc Networks. *IEEE Communications Magazine*, v. 46, n. 6, p. 164–171, 2008. ISSN 0163-6804. Citado na página 5.
- HE, Z. et al. Exploiting Real-time Traffic Light Scheduling with Taxi Traces. *2016 45th International Conference on Parallel Processing (ICPP)*, p. 314–323, 2016. Citado na página 10.
- HSIEH, T.-Y.; TSAI, P.-C. A novel traffic light management mechanism on intersection. In: *2013 13th International Conference on ITS Telecommunications (ITST)*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 111–115. ISBN 9781479908462. Citado 6 vezes nas páginas 11, 10, 16, 17, 18 e 23.
- IEEE. *IEEE Guide for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Architecture*. [S.l.: s.n.], 2014. 1–78 p. ISBN 9780738187563. Citado 4 vezes nas páginas 11, 8, 9 e 10.
- JAGADEESH, Y. M. et al. Smart autonomous traffic light switching by traffic density measurement through sensors. In: *2015 International Conference on Computers, Communications, and Systems (ICCCS)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 123–126. ISBN 9781467397568. Citado na página 10.
- 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, 2012. Disponível em: <<http://sumo.sourceforge.net/>>. Citado na página 35.
- KUMAR, V. et al. iTETRIS: Adaptation of ITS Technologies for Large Scale Integrated Simulation. In: *2010 IEEE 71st Vehicular Technology Conference*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–5. ISSN 1550-2252. Citado na página 42.
- KWATIRAYO, S.; ALMHANA, J.; LIU, Z. Adaptive Traffic Light Control using VANET: A case study. *2013 9th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, p. 752–757, 2013. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6583651>>. Citado na página 26.

- KWATIRAYO, S.; ALMHANA, J.; LIU, Z. Optimizing intersection traffic flow using VANET. *2013 IEEE International Conference on Sensing, Communications and Networking, SECON 2013*, p. 260–262, 2013. Citado 4 vezes nas páginas 10, 16, 17 e 23.
- LEE, W.-h.; LAI, Y.-c.; CHEN, P.-y. A Study on Energy Saving and CO₂ Emission Reduction on Signal Countdown Extension by Vehicular Ad Hoc Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 64, n. 3, p. 890–900, 2015. ISSN 0018-9545. Citado na página 1.
- LI, J.; ZHANG, Y.; CHEN, Y. A Self-Adaptive Traffic Light Control System Based on Speed of Vehicles. *2016 IEEE International Conference on Software Quality, Reliability and Security Companion (QRS-C)*, p. 382–388, 2016. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7573773/>>. Citado 4 vezes nas páginas 10, 16, 17 e 23.
- LI, S. E. et al. An Overview of Vehicular Platoon Control Under the Four-Component Framework. *2015 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, v. 2015-Augus, n. IV, p. 286–291, 2015. Citado na página 16.
- LIN, Y.; WANG, P.; MA, M. Intelligent Transportation System(ITS): Concept, Challenge and Opportunity. *2017 IEEE 3rd International Conference on Big Data Security on Cloud (BigDataSecurity), IEEE International Conference on High Performance and Smart Computing, (HPSC) and IEEE International Conference on Intelligent Data and Security (IDS)*, p. 167–172, 2017. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7980336/>>. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 5.
- MASLEKAR, N. et al. VANET Based Adaptive Traffic Signal Control. *2011 IEEE 73rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, p. 1–5, 2011. ISSN 1550-2252. Citado na página 26.
- NEUENDORF, N.; BRUNS, T. The Vehicle Platoon Controller in the Decentralised, Autonomous Intersection Management of Vehicles. *Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics, 2004. ICM '04.*, p. 375–380, 2004. Citado na página 16.
- NOORI, H. Realistic urban traffic simulation as vehicular Ad-hoc network (VANET) via Veins framework. In: *2012 12th Conference of Open Innovations Association (FRUCT)*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1–7. Citado na página 35.
- PANDIT, K. et al. Adaptive Traffic Signal Control With Vehicular Ad hoc Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 62, n. 4, p. 1459–1470, 2013. ISSN 1617-7975. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-1-84800-328-6>>. Citado 13 vezes nas páginas 11, 10, 16, 17, 18, 19, 22, 23, 26, 36, 37, 38 e 51.
- PETROV, T. et al. Evaluation of packet forwarding approaches for emergency vehicle warning application in VANETs. In: *2018 ELEKTRO*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–5. Citado na página 35.
- RONDINONE, M. et al. iTETRIS: A modular simulation platform for the large scale evaluation of cooperative ITS applications. *Simulation Modelling Practice and Theory*, v. 34, p. 99–125, 2013. ISSN 1569-190X. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1569190X1300018X>>. Citado na página 42.

- ROSYADI, A. R.; WIRAYUDA, T. A. B.; AL-FARABY, S. Intelligent traffic light control using collaborative Q-Learning algorithms. In: *2016 4th International Conference on Information and Communication Technology (ICoICT)*. [s.n.], 2016. v. 4, p. 1–6. ISBN 978-1-4673-9879-4. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7571925/>>. Citado na página 10.
- SAINI, M.; ALELAIWI, A.; SADDIK, A. E. How Close are We to Realizing a Pragmatic VANET Solution? A Meta-Survey. *ACM Computing Surveys*, v. 48, n. 2, p. 1–40, 2015. ISSN 03600300. Disponível em: <<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84954315402%7B%7DpartnerID=tZOtx3y1>>. Citado na página 5.
- SHI, J. et al. There is a Will, There is a Way: A New Mechanism for Traffic Control Based on VTL and VANET. *2015 IEEE 16th International Symposium on High Assurance Systems Engineering*, p. 240–246, 2015. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7027437>>. Citado 4 vezes nas páginas 10, 16, 17 e 23.
- SOMMER, C.; DRESSLER, F. Using the Right Two-Ray Model? A Measurement based Evaluation of PHY Models in VANETs. In: *17th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2011), Poster Session*. Las Vegas, NV: ACM, 2011. Citado na página 37.
- SOMMER, C. et al. A computationally Inexpensive Empirical Model of IEEE 802.11p Radio Shadowing in Urban Environments. *2011 8th International Conference on Wireless On-Demand Network Systems and Services, WONS 2011*, p. 84–90, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 35.
- SOMMER, C.; JOERER, S.; DRESSLER, F. On the Applicability of Two-Ray Path Loss Models for Vehicular Network Simulation. In: *4th IEEE Vehicular Networking Conference (VNC 2012)*. Seoul, Korea: IEEE, 2012. p. 64–69. Citado na página 38.
- SOMMER, C. et al. Emissions vs. Travel Time: Simulative Evaluation of the Environmental Impact of ITS. In: *2010 IEEE 71st Vehicular Technology Conference*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–5. ISSN 1550-2252. Citado na página 36.
- SOUSA, R. S. D.; SOARES, A. C. B. Estimativa e Sinalização de Congestionamentos de Tráfego através de Redes Veiculares V2V. *XXXIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, p. 655–667, 2015. Citado na página 35.
- UZCÁTEGUI, R. A.; ACOSTA-MARUM, G. Wave: A tutorial. *IEEE Communications Magazine*, v. 47, n. 5, p. 126–133, 2009. ISSN 01636804. Citado na página 9.
- VARGA, A.; HORNIG, R. An Overview of the OMNeT++ Simulation Environment. *Proceedings of the 1st International Conference on Simulation Tools and Techniques for Communications, Networks and Systems & Workshops*, p. 60:1—60:10, 2008. Disponível em: <<http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1416222.1416290>>. Citado na página 35.
- WANGHAM, M. S. et al. Segurança em Redes Veiculares: Inovações e Direções Futuras. *Minicursos do Simpósio Brasileiro em Segurança da Informação e de Sistemas Computacionais - SBSeg 2014*, p. 145–194, 2014. Citado na página 9.
- WEBSTER, F. V.; COBBE, B. M. *Traffic signals*. [S.l.]: H.M.S.O., 1966. (Road research technical paper). Citado 4 vezes nas páginas 19, 26, 38 e 46.

- XIAO, Z. et al. An Intelligent Traffic Light Control Approach for Reducing Vehicles CO₂ Emissions in VANET. *2015 12th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD)*, p. 2070–2075, 2015. Citado 6 vezes nas páginas 10, 16, 17, 23, 36 e 51.
- YOUNES, M. B.; BOUKERCHE, A. A performance evaluation of an efficient traffic congestion detection protocol (ECODE) for intelligent transportation systems. *Ad Hoc Networks*, Elsevier B.V., v. 24, n. PA, p. 317–336, 2015. ISSN 15708705. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.adhoc.2014.09.005>>. Citado 6 vezes nas páginas 11, 20, 21, 29, 30 e 44.
- YOUNES, M. B.; BOUKERCHE, A. Intelligent Traffic Light Controlling Algorithms Using Vehicular Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 65, n. 8, p. 5887–5899, 2016. ISSN 0018-9545. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7277098>>. Citado 17 vezes nas páginas 11, 2, 10, 16, 17, 19, 20, 22, 23, 24, 25, 29, 33, 35, 36, 38 e 51.
- YOUNES, M. B.; BOUKERCHE, A.; MAMMERI, A. Context-Aware traffic light self-scheduling algorithm for intelligent transportation systems. In: *2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–6. ISBN 9781467398145. ISSN 15253511. Citado 6 vezes nas páginas 10, 16, 17, 23, 36 e 51.
- YOUNIS, O.; MOAYERI, N. Cyber-Physical Systems : A Framework for Dynamic Traffic Light Control at Road Intersections. *2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, n. Wcnc, p. 1–6, 2016. Citado 4 vezes nas páginas 10, 16, 17 e 23.