UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE INFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

DIOCLECIANO DANTAS NETO

UMA ANÁLISE DA IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS INTELIGENTES DE TRANSPORTE NA REGIÃO METROPOLITANA DO RECIFE: enfoque em arquitetura de redes veiculares

Recife

2017

DIOCLECIANO DANTAS NETO

UMA ANÁLISE DA IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS INTELIGENTES DE TRANSPORTE NA REGIÃO METROPOLITANA DO RECIFE: enfoque em arquitetura de redes veiculares

Este trabalho foi apresentado à Pós-Graduação em Ciência da Computação do Centro de Informática da Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciência da Computação.

Área de Concentração: sistemas de comunicação.

Orientador: Daniel Carvalho da Cunha

Recife

2017

Catalogação na fonte
Bibliotecária Mariana de Souza Alves CRB4-2105

D192a Dantas Neto, Diocleciano
Uma análise da implantação de sistemas inteligentes de transporte na Região Metropolitana do Recife: enfoque em arquitetura de redes veiculares/ Diocleciano Dantas Neto – 2017.
66 f., fig., tab.

Orientador: Daniel Carvalho da Cunha.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CIn, Ciência da Computação. Recife, 2017.
Inclui referências.

1. Sistemas de Comunicação. 2. Redes Veiculares. 3. Comunicação Interveicular. 4. Sistema Inteligente de Transporte. I. Cunha, Daniel Carvalho da (orientador). II. Título.

004 CDD (22. ed.) UFPE-MEI 2019-165

Diocleciano Dantas Neto

Uma Análise da Implantação de Sistemas Inteligentes de Transporte na Região Metropolitana do Recife: Enfoque em Arquitetura de Redes Veiculares

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.

Aprovado em: 15/09/2017.

BANCA EXAMINADORA

_____

Prof. Dr. Carlos André Guimarães Ferraz
Centro de Informática/UFPE

_____

Prof. Dr. Cecilio José Lins Pimentel
Departamento de Eletrônica e Sistemas/UFPE

_____

Prof. Dr. Daniel Carvalho da Cunha
Centro de Informática / UFPE
(Orientador)

Dedico este trabalho à minha família, em especial à minha esposa Isabella.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à minha família pelos incentivos e pelo apoio incondicional demonstrado no decorrer do desenvolvimento deste trabalho. Em especial à minha esposa Isabella.

Agradeço ao Prof. Abel Guilhermino do Centro de Informática da UFPE pela disponibilização de parte dos recursos computacionais utilizados neste estudo.

Sou imensamente grato ao Prof. Cecílio Pimentel do Departamento de Eletrônica e Sistemas da UFPE por, de pronto, disponibilizar uma máquina em um momento crucial, viabilizando, assim, a conclusão deste trabalho.

Agradeço aos colegas e amigos do Centro de Informática que, direta ou indiretamente, contribuíram de alguma forma para a conclusão dessa dissertação. Em especial ao amigo Robson Timoteo que em um momento de dificuldade me motivou a prosseguir.

Em especial, agradeço a meu orientador, Prof. Daniel Cunha, que foi o grande o incentivador desde da concepção do pré-projeto de mestrado. Pela sua paciência, pelos seus conselhos e pelas "broncas"dadas nos momentos certos.

Por fim, agradeço à FACEPE - Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia de Pernambuco pelo apoio financeiro concedido através de uma bolsa de estudos.

"A nossa maior conquista não reside no fato de nunca cairmos, mas sim em levantarmo-nos sempre depois de cada queda."

(Oliver Goldsmith, 2017)

RESUMO

Um dos grandes desafios enfrentados pelos gestores dos grandes centros urbanos é a mobilidade. Em 2012, foi publicada a Política Nacional de Mobilidade Urbana pelo Ministério das Cidades, que estabeleceu a obrigatoriedade de um Plano de Mobilidade Urbana para municípios com mais de 20 mil habitantes. Com base nessa política, foi realizada a complementação do referido plano pela Prefeitura do Recife, que entre os seus aspectos pode-se citar: "desenvolvimento do ferramental necessário para análise do sistema de transporte atual e prognóstico dos deslocamentos e projetos futuros". Tendo em vista tais fatos, esta dissertação propõe a implantação de um Sistema Inteligente de Transporte (ITS – *Intelligent Transportation System*) na principal via pertencente ao corredor norte-sul da capital pernambucana. Tal sistema é composto por uma aplicação híbrida com funções para monitoramento de tráfego e segurança (*safety*) utilizando-se tecnologia de comunicação inter-veicular (IVC – *Inter-Vehicular Comunication*) híbrida composta pelo padrão IEEE 802.11p e redes de celular LTE. O cenário para simulação foi modelado a partir de dados de tráfego reais disponibilizados pela Companhia de Trânsito e Transporte Urbano do Recife. É analisado o tempo médio de trajeto dos veículos e a distância média percorrida, na ótica da mobilidade, e os parâmetros de redes latência (*delay*) e taxa de entrega de pacotes (PDR – *packet delivery rate*). O ITS proposto foi capaz de reduzir em até 48,7% o tempo médio de trajeto desperdiçado nos congestionamentos ocasionados por acidentes, enquanto a distância média percorrida sofreu um acréscimo de no máximo 8,8%.

Palavras-chaves: Redes Veiculares. Comunicação Interveicular. Sistema Inteligente de Transporte.

ABSTRACT

One of the major challenges faced by managers of large urban centers is mobility. In 2012, the National Policy on Urban Mobility was published by the Ministry of Cities, which established an Urban Mobility Plan for municipalities with more than 20 thousand inhabitants. Based on this policy, the Plan was complemented by the Recife City Hall, which among its aspects we can mention: "development of the necessary tool for analysis of the current transportation system and prognosis of displacements and future projects." Considering these facts, this dissertation proposes the implementation of an Intelligent Transportation System (ITS) in the main highway belonging to the north-south corridor of the Pernambuco state capital. This system consists of a hybrid application with functions for traffic monitoring and safety using hybrid inter-vehicular communication (IVC) technology composed of the IEEE 802.11p standard and LTE cellular networks. The scenario for simulation was modeled from real traffic data provided by the Transit and Urban Transport Company of Recife. It is analyzed the vehicles average traveling time and average distance traveled from the mobility point of view and the delay and packet delivery rate (PDR) network parameters. The proposed ITS was able to reduce by 48.7% the average journey time wasted in the congestion, while the average distance covered increased by a maximum of 8.8%.

Keywords: Vehicular Networking. Inter-vehicular Networks. Intelligent Transportation System.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação da concepção de um ITS. 19
Figura 2 – Comunicação V2X para redes veiculares utilizando tecnologia híbrida por meio de RSUs, semáforos e uma ERB (Estação Rádio Base) como infraestrutura. 20
Figura 3 – Espectro DSRC utilizado pelo padrão WAVE. 21
Figura 4 – Comparação entre o modelo WAVE e o modelo de referência OSI. . . . 21
Figura 5 – Fases fundamentais do princípio geral para simulações típicas de tráfego veicular. 23
Figura 6 – Modelos em potencial para simulação de mobilidade para redes veiculares. 24
Figura 7 – Relação entre simuladores de mobilidade e simuladores de redes utilizados para VANETs. 25
Figura 8 – Uma perspectiva espaço-temporal de aplicações para CAV. 30
Figura 9 – Taxonomia de modelos de propagação de sinais sem fio para VANETs. 31
Figura 10 – Taxonomia de simuladores para VANETs. 32
Figura 11 – Arquitetura do *framework* Veins para simulação de VANETs. 32
Figura 12 – Trecho da RMR do Recife considerada para a realização do estudo (imagem extraída da ferramenta OSM Web Wizard). 39
Figura 13 – Média do fluxo de veículos por hora no mês de maio de 2015 na Av. Gov. Agamenon Magalhães no sentido Sul-Norte. 40
Figura 14 – Exemplos dos problemas enfrentados na exportação do cenário de mobilidade para o SUMO a partir do (OpenStreetMap, 2017).(a) e (b) representam, respectivamente, o Cruzamento entre a Av. Gov. Agamenon Magalhães e a Av. Rui Barbosa antes e após os ajustes realizados. (c) e (d) representam, respectivamente, o cruzamento entre a Av. Conde da Boa Vista e a Rua Dom Bosco antes e após os ajustes realizados e em destaque (círculos azuis) a sinalização das conversões permitidas. . . . 41
Figura 15 – Impasse entre veículos no simulador de mobilidade SUMO. 42
Figura 16 – Congestionamento causado pelo impasse entre veículos no simulador de mobilidade SUMO. Os veículos estão representados em vermelho. . . 42
Figura 17 – Retenção causada pela falta de oportunidade dos condutores na via principal passarem para a via local devido ao intenso fluxo de veículos (quadrado pontilhado em azul). 43
Figura 18 – Trecho da RMR com indicação da localização das RSUs. 44
Figura 19 – Trecho da RMR com indicação da localização da eNodeB. 45
Figura 20 – Esquema do funcionamento do ITS proposto no Veins. 48

Figura 21 – Média do tempo de trajeto desperdiçado no congestionamento ocasionado pelo acidente induzido para os cenários simulados. 50
Figura 22 – Histogramas para o tempo de trajeto nos cenários simulados: (a) sem acidente, (b) com acidente, (c) V2V, (d) V2X-RSU e (e) V2X-LTE. . . 51
Figura 23 – Diferença da distância média percorrida para os cenários simulados. . . 52
Figura 24 – Histogramas para a distância percorrida nos cenários: (a) sem acidentes, (b) com acidentes, (c) V2V, (d) V2X-RSU e (e) V2X-LTE. 53
Figura 25 – Total de pacotes recebidos para os cenários simulados. 54
Figura 26 – Média do PDR para os cenários simulados com o intervalo de confiança para a média com α= 0,05. 54
Figura 27 – PDR para os veículos ordenados por tempo de entrada na simulação nos cenários: (a) V2V, (b) V2X-RSU e (c) V2X-LTE. 55
Figura 28 – Histogramas para o PDR nos cenários: (a) V2V, (b) V2X-RSU e (c) V2X-LTE. 56
Figura 29 – Média da latência para os cenários simulados com o intervalo de confiança para a média com α= 0,05. 57
Figura 30 – Latência média para os veículos ordenados por tempo de entrada na simulação nos cenários: (a) V2V, (b) V2X-RSU e (c) V2X-LTE. 58
Figura 31 – Histogramas para a latência média nos cenários: (a) V2V, (b) V2X-RSU e (c) V2X-LTE. 59
Figura 32 – Quantidade de mensagens enviadas e recebidas por veículo através da rede LTE. O eixo das ordenadas está em escala logarítmica. Os veículos estão ordenados por tempo de entrada na simulação e identificados no eixo das abscissas pelos números de 0 a 3499. 60
Figura 33 – Gráficos da quantidade de pacotes recebidos nas simulações complementares com diferentes níveis de impaciência para os cenários V2V e V2X-RSU. (a) e (c) são referentes ao cenário V2X-RSU, respectivamente, com níveis de impaciência 0 e 0,7. (b) e (d) são referentes ao cenário V2V, respectivamente, com níveis de impaciência 0 e 0,7. . . . 62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais fornecedores de módulos DSRC para VANETs. 22
Tabela 2 – Principais fornecedores de plataformas de pesquisa e desenvolvimento para VANETs. 22
Tabela 3 – Principais tecnologias de comunicação candidatas para uso em VANETs. 26
Tabela 4 – Simuladores para redes veiculares. 33
Tabela 5 – Parâmetros configurados para as simulações. 48
Tabela 6 – Duração das simulações para o conjunto de simulações com 3500 veículos e a quantidade de repetições considerada para cada cenário. . . . 49
Tabela 7 – Tempo de trajeto para todos os cenários simulados com média amostral, desvio padrão amostral, valores mínimo e máximo da amostra e intervalo de confiança (α= 0,05) para a média amostral. 50
Tabela 8 – Distância percorrida para todos os cenários simulados com média amostral, desvio padrão amostral, valores mínimo e máximo da amostra e intervalo de confiança (α= 0,05) para a média amostral. 52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANTP	ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES PÚBLICOS. 16
AODV	AD-HOC ON DEMAND DISTANCE VECTOR. 28
AOI	AREA OF INTEREST. 36
AP	AUTOMATED VALET/STREET PARKING. 29
AVT	ADAPTIVE VEHICLE TUNING. 28
CAV	CONNECTED AND AUTOMATED VEHICLES. 7, 28, 30
CCW	COLLABORATIVE COLLISION WARNING. 28, 29, 47, 56
CDPA	CLOUD-BASED DIAGNOSTICS/PROGNOSTICS/ANALYTICS. 29
CHIMERA	CONGESTION AVOIDANCE THROUGH A TRAFFIC CLASSIFCATION MECHANISM AND A REROUTING ALGORITHM. 36, 37
COSMO	COLLABORATIVE SYSTEM FOR MOBILITY OPTIMIZATION. 40
CSW	CURVE SPEED WARNING. 28
D2D	DEVICE-TO-DEVICE. 26, 27
DRP	DYNAMIC ROUTE PLANNING. 34, 47
DSDV	DESTINATION SEQUENCED DISTANCE VECTOR. 28
DSR	DYNAMIC SOURCE ROUTING. 28
DSRC	DEDICATED SHORT-RANGE COMMUNICATIONS. 7, 9, 20–22, 26, 27, 44
DTA	DYNAMIC TRAFFIC ASSIGNMENT. 35
ENODEB	EVOLVED NODE B. 44, 46
ERB	ESTAÇÃO RÁDIO BASE. 7, 20
ESS	EXTENDED SURROUNDING SENSING. 29
FEP	FUEL-ECONOMY-ORIENTED TRIP PLANNING. 28
HETVNETS	HETEROGENEOUS VEHICULAR NETWORKS. 27
IBGE	INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 16

ITS	INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEM. 7, 17, 19, 21, 23, 34, 36, 38, 39, 41, 43, 47–50, 54–56, 61, 63, 64
LEZ	LOW EMISSION ZONE. 28
LTE	LONG TERM EVOLUTION. 8, 17, 25–27, 44–47, 59, 60
LTE-A	LTE ADVANCED. 25, 26
MANET	MOBILE AD HOC NETWORK. 28
OBU	ON-BOARD UNIT. 19
OLSR	OPTIMIZED LINKSTATE ROUTING. 28
OSI	OPEN SYSTEM INTERCONNECTION. 7, 21
PCS	PRE-CRASH SENSING. 28
PDR	PACKET DELIVERY RATE. 8, 34, 53–57, 63
RBS	RESOURCE BLOCKS. 46
RMR	REGIÃO METROPOLITANA DO RECIFE. 16, 17, 38, 50, 63
RSU	ROAD SIDE UNIT. 7, 17, 19, 20, 27, 34, 44, 54, 58
RVC	REMOTE VEHICLE COMMAND. 29
S-UE	STOCHASTIC USER EQUILIBRIUM. 35
SD-VANET	SOFTWARE DEFINED VANET. 27
SDN	SOFTWARE-DEFINED NETWORKING. 27, 33
STRMT-PDR	SISTEMA EM TEMPO REAL PARA MONITORAMENTO DE TRÁFEGO COM PLANEJAMENTO DINÂMICO DE ROTAS. 47, 56
SUMO	SIMULATION OF URBAN MOBILITY. 7, 17, 32, 34–36, 38–42, 45–48, 60, 64
TAP	TRANSMIT AGGREGATION PERIOD. 35, 36
TJA	TRAFFIC JAM ASSIST. 28
TRACI	TRAFFIC CONTROL INTERFACE. 35, 36
UES	USER EQUIPMENTS. 46
UMTS	UNIVERSAL MOBILE TELECOMMUNICATIONS SYSTEM. 25
V2I	VEHICLE-TO-INFRASTRUCTURE. 17, 20, 25–27, 34

V2V	VEHICLE-TO-VEHICLE. 17, 20, 25–27, 34, 36, 44
V2X	VEHICLE-TO-EVERYTHING. 7, 17, 20, 23, 27, 44
VANETS	VEHICULAR AD HOC NETWORKS. 7, 9, 13, 16, 17, 19–22, 25–28, 30–32, 34–38, 57, 63, 64
VEINS	VEHICLE IN NETWORK SIMULATION. 7, 17, 27, 32, 34, 35, 38, 45–48, 63
WAVE	WIRELESS ACCESS IN VEHICULAR ENVIRONMENTS. 7, 21, 33, 44, 47, 56, 57, 60

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 16
1.1 Motivação e Justificativa 16
1.2 Principais Contribuições 17
1.3 Organização da Dissertação 18

2 REVISÃO DA LITERATURA 19
2.1 Conceitos Gerais 19
2.1.1 VANETs 19
2.1.2 Modelagem de Cenários para Simulações de Tráfego 22
2.1.3 Simuladores para Redes Veiculares 23
2.2 Tecnologias Candidatas para VANETs 25
2.3 Protocolos de Roteamento 27
2.4 Aplicações para ITS 28
2.5 Simuladores 30
2.6 Trabalhos Relacionados 33

3 METODOLOGIA E RESULTADOS OBTIDOS 38
3.1 Modelagem dos Cenários Investigados 38
3.1.1 Mobilidade Urbana 38
3.1.2 Arquiteturas e Tecnologias de Comunicação 44
3.1.3 Limitações do Veins LTE 1.3 46
3.2 Aplicações Desenvolvidas 47
3.3 Simulações Realizadas 48
3.4 Resultados 49

4 CONCLUSÃO 63
4.1 Trabalhos Futuros 63
4.2 Considerações Finais 64

REFERÊNCIAS 65

1 INTRODUÇÃO

A tecnologia sempre caminhou ao lado da inovação, tendo um papel essencial no progresso da sociedade. Novas tecnologias surgem, em geral, da necessidade em atender os anseios da coletividade, apresentando, assim, um potencial relevante em trazer transformações benéficas ao cotidiano da população. Um exemplo disso é o surgimento das redes veiculares ou, como também denominadas, VANETs *(Vehicular Ad Hoc Networks)*. VANETs foram concebidas pela necessidade crescente na busca de mais segurança física em ruas e rodovias para condutores, passageiros e pedestres, como também na busca de um tráfego de veículos mais eficiente.

1.1 Motivação e Justificativa

A mobilidade eficiente em grandes centros urbanos é um dos grandes desafios enfrentados no cotidiano da sociedade. A baixa qualidade no transporte público é um dos fatores que impulsionam o crescimento do transporte individual nas vias urbanas. O transporte individual é adotado pela necessidade de locomoção mais ágil e confortável. Entretanto, grande parte dos centros urbanos não estão preparados para lidar com grandes quantidades de veículos, favorecendo, assim, a formação de congestionamentos. A situação é mais crítica na ocorrência de acidentes que podem bloquear grandes vias agravando significativamente os congestionamentos. Deve-se, também, levar em consideração a degradação ambiental ocasionada pela grande quantidade de poluentes liberadas pelos veículos no meio ambiente. O impacto mais perceptível dos congestionamentos é o aumento do tempo trajeto. Com o aumento no tempo de trajeto o fator econômico também sofre impactos. Segundo a ANTP (Associação Nacional de Transportes Públicos), o tempo médio de percurso de uma linha de ônibus é levado em consideração na composição da tarifa viária (ANTP, 2012). Assim sendo, o aumento das passagens é inexoravelmente influenciado pelas consequências dos congestionamentos. Segundo pesquisa realizada pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), o gasto com transporte, em média, representa 19,6% da renda dos brasileiros, enquanto que o gasto com alimentação representa 19,8% (IBGE, 2009). Em complemento a pesquisa supracitada, segundo O Globo (2015), 36,8% da população brasileira se locomove a pé, 30,9% de carro ou moto, 28,8% de ônibus e 3,4% de bicicleta. Na RMR (Região Metropolitana do Recife) a cada R$ 25,00 produzidos, R$ 1,00 foi desperdiçado em consequência dos congestionamentos (Sistema FIRJAN, 2015), sendo a capital pernambucana considerada a 43° cidade mais congestionada do mundo (TomTom, 2016), com 145 horas desperdiçados por ano em congestionamentos.

O Ministério das Cidades, do Brasil, publicou em 2012 a Política Nacional de Mobilidade Urbana que estabeleceu a obrigatoriedade de um Plano de Mobilidade Urbana para

municípios com mais de 20 mil habitantes. A Prefeitura do Recife, baseado nessa política, atualizou o plano de mobilidade para a cidade do Recife. A seguinte diretriz foi incluída: "desenvolvimento do ferramental necessário para análise do sistema de transporte atual e prognóstico dos deslocamentos e projetos futuros". Com base nessas informações, esta dissertação promove uma análise da implantação de um Sistema Inteligente de Transporte, também denominado por ITS *(Intelligent Transportation System)*, na região central do Recife, contemplando a Av. Governador Agamenon Magalhães, principal via integrante do corredor Norte-Sul. Os primeiros ITSs implantados no Brasil, que obtiveram grande popularização, foram o de bilhetagem eletrônica e o de monitoramento da frota de transporte público, tendo como exemplo, a implantação dos sistemas supracitados na RMR, além de outras cidades brasileiras como Florianópolis-SC, Fortaleza-CE, Goiânia-GO, Porto Alegre-RS e Rio de Janeiro-RJ.

1.2 Principais Contribuições

O ITS proposto nesta dissertação tem como principal objetivo mitigar os transtornos causados por congestionamentos. O sistema visa reduzir o tempo médio de trajeto em situações onde congestionamentos são detectados, como por exemplo, na ocorrência de acidentes. Em complemento, uma aplicação de segurança *(safety)* foi integrada ao ITS com o intuito de alertar instantaneamente aos condutores sobre a ocorrência de acidentes. O ITS proposto faz uso de tecnologia de comunicação inter-veicular através de VANETs. A comunicação pode se dar de veículo para veículo, denominada V2V *(Vehicle-to-Vehicle)*, ou de veículo para infraestrutura e vice-e-versa, denominada V2I *(Vehicle-to-Infrastructure)*. A comunicação híbrida pode ser denominada de V2X *(Vehicle-to-Everything)*. Para simular a implantação do ITS na região escolhida, foi feito o uso do *framework* Veins *(Vehicle in Network Simulation)*, que integra os já bem estabelecidos simuladores OMNet++, para redes, e o SUMO *(Simulation of Urban MObility)*, para mobilidade. Uma área de 25 km² da região central do Recife foi selecionada para a implantação do ITS. Três arquiteturas de comunicação para VANETs foram adotadas, quais sejam, uma somente com comunicação V2V, outra com comunicação V2X, utilizando RSUs *(Road Side Units)* como infraestrutura e a última com comunicação V2X, utilizando uma rede LTE *(Long Term Evolution)* como infraestrutura. Os respectivos cenários para cada arquitetura de comunicação foram modelados e simulados, a fim de avaliar o comportamento do ITS proposto. Algumas modificações na implementação do *framework* Veins foram realizadas para atender a requisitos específicos apresentados no desenvolvimento dessa dissertação que podem ser utilizadas em trabalhos semelhantes. Com a atuação do ITS proposto foi obtida uma redução de até 48,7% no tempo médio de trajeto desperdiçado em congestionamentos em situações com acidentes, com um acréscimo de no máximo 8,8% na distância média percorrida. Essa dissertação documenta todo o processo na abordagem e avaliação do problema, evidenciando as dificuldades e os desafios enfrentados.

1.3 Organização da Dissertação

Essa dissertação está dividida, além da seção introdutória, em mais três seções. Na Seção 2 são apresentados conceitos gerais necessários ao entendimento do trabalho desenvolvido, bem como é realizada a revisão da literatura relacionada a este estudo. A Seção 3 descreve a metodologia utilizada, descrevendo os desafios enfrentados, e os resultados são apresentados e analisados. Por fim, na Seção 4 são apresentadas as conclusões, os trabalhos futuros e as considerações finais.

2 REVISÃO DA LITERATURA

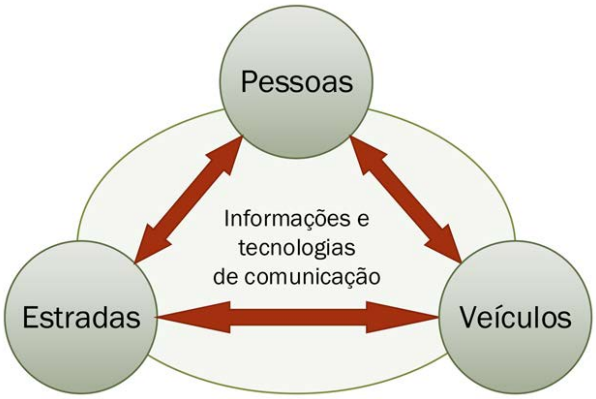
Nos últimos anos, as VANETs vem conquistando uma posição de destaque no campo de pesquisa industrial e acadêmico por seu potencial em proporcionar soluções inovadoras capazes de impactar positivamente o cotidiano da sociedade. Em geral, pesquisas voltadas para ITS visam mitigar impactos causados por congestionamentos e acidentes tanto em rodovias quanto em perímetros urbanos. Para tanto, a disseminação eficiente da informação pertinente a cada tipo de aplicação necessita ser alcançada dentro dos requisitos de comunicação, tempo e abrangência definidos pelos padrões propostos na literatura.

Há diversas áreas de pesquisa em VANETs, as quais podemos destacar as aplicações veiculares para ITSs, as tecnologias de comunicação e os protocolos de roteamento. A seguir, serão apresentados conceitos gerais e, em seguida, cada área supracitada será descrita com maiores detalhes.

2.1 Conceitos Gerais

Os elementos principais para a concepção de um ITS são pessoas, veículos, estradas e a troca de informações através de tecnologias de comunicação, conforme ilustra a Figura 1.

Figura 1 – Representação da concepção de um ITS.



Fonte: O autor (2017)

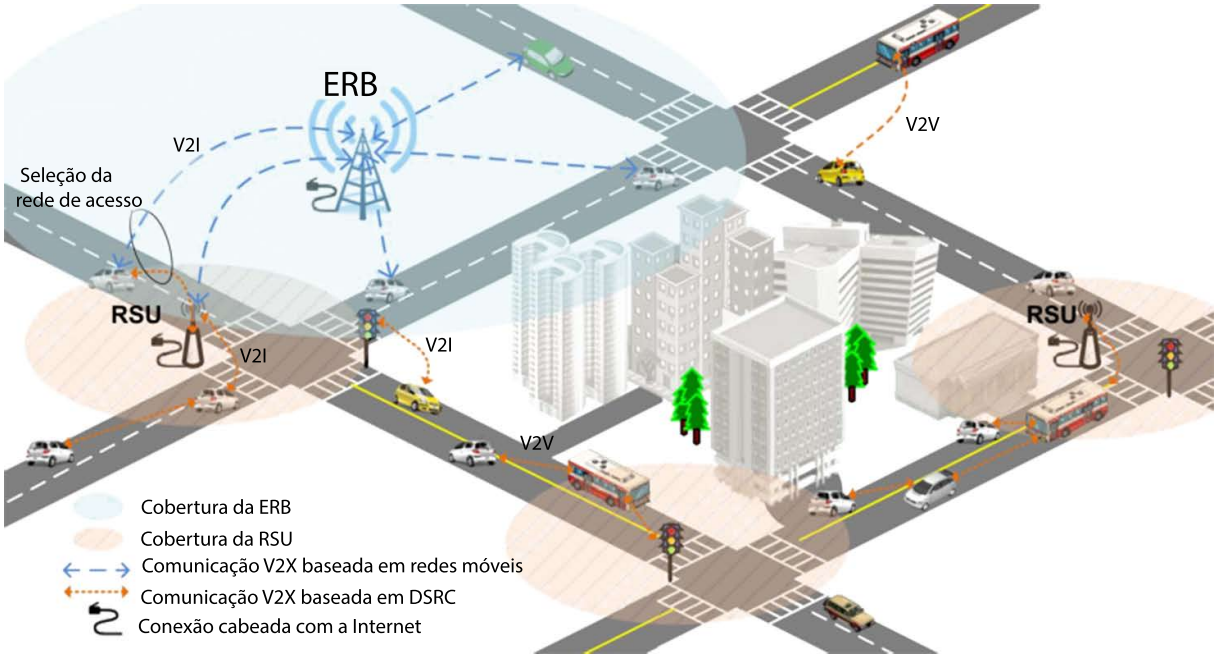
A evolução dos ITSs se deu de forma acelerada, multifacetada e, por diversas vezes, baseada em avanços tecnológicos considerados revolucionários. Dito isto, as VANETs cumprem um papel fundamental dando suporte à troca de informações de maneira eficaz.

2.1.1 VANETs

Em uma arquitetura convencional de VANETs, os componentes básicos são a OBU *(On-Board Unit)*, instalada nos veículos, e as RSU *(Road Side Units)*, instaladas ao longo

das vias como infraestrutura. As comunicações entre esses componentes são denominadas de V2V *(Vehicle-to-Vehicle)*, quando veículos trocam informações entre si, ou de V2I *(Vehicle-to-Infrastructure)*, quando veículos trocam informações com as RSUs e vice-e-versa. Há também as arquiteturas híbridas, que integram diferentes tecnologias de comunicação, por exemplo, redes de telefonia celular e comunicações através de DSRC *(Dedicated Short-Range Communications)*. DSRC é uma tecnologia de comunicação bidirecional de baixo a médio alcance, com baixa latência e taxas altas de transferência, desenvolvida especificamente para dar suporte às comunicações V2V e V2I. Denota-se a comunicação entre veículos e infraestrutura híbrida por comunicação V2X *(Vehicle-to-Everything)*. Na Figura 2 estão representados os diferentes tipos de comunicação anteriormente mencionados.

Figura 2 – Comunicação V2X para redes veiculares utilizando tecnologia híbrida por meio de RSUs, semáforos e uma ERB (Estação Rádio Base) como infraestrutura.



Fonte: adaptado de Abboud, Omar e Zhuang (2016, p. 9461).

A principal tecnologia de comunicação utilizada em VANETs é a tecnologia DSRC. A operação dessa tecnologia pode se dar em diferentes faixas de frequências, a depender do padrão adotado (ABBOUD; OMAR; ZHUANG, 2016). A seguir estão listados os padrões para redes veiculares com as suas respectivas localidades e faixas de operação.

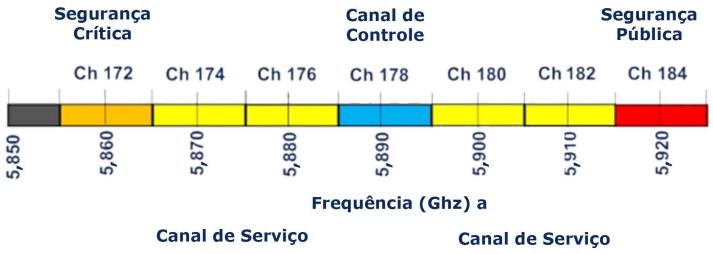
- IEEE 1609.0
  - Local: América do Norte
  - Faixa de frequência: 5,85-5,925 GHz
- ETSI EN 302 665

  - Local: Europa
  - Faixa de frequência: 5,75-5,815 GHz

- ARIB STD-T109
  - Local: Japão
  - Faixa de frequência: 755,5-764,5 MHz

Para essa dissertação, foi adotado o padrão WAVE *(Wireless Access in Vehicular Enviroments)* para aplicações voltadas para ITS, que utiliza como base a arquitetura definida no padrão IEEE 1609.0. A divisão dos canais do espectro utilizado pelo padrão WAVE está representada na Figura 3.

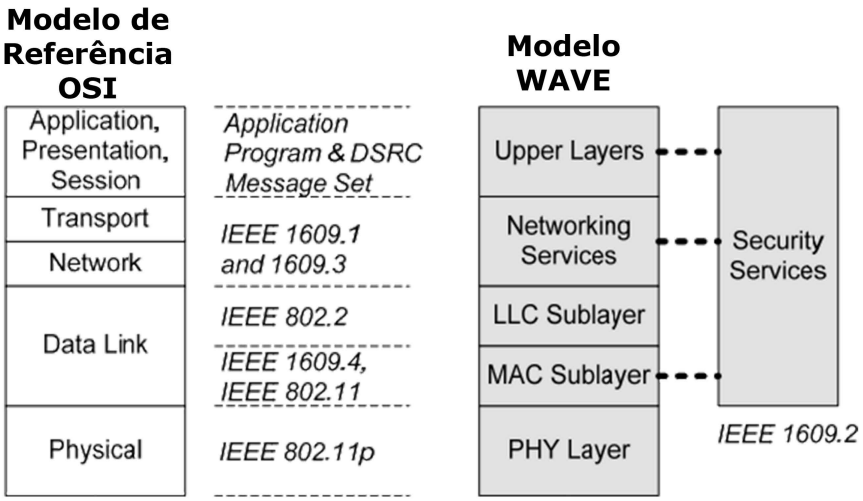
Figura 3 – Espectro DSRC utilizado pelo padrão WAVE.



Fonte: Vivek et al. (2014, p. 2).

O modelo do padrão WAVE é confrontado em detalhes com o modelo de referência OSI *(Open System Interconnection)* na Figura 4, onde os padrões integrantes da arquitetura de comunicação IEEE 1609.0 estão associados às camadas correspondentes do padrão OSI.

Figura 4 – Comparação entre o modelo WAVE e o modelo de referência OSI.



Fonte: adaptado de Kelley, Chriss e Sumner (2010, p. 33).

Os esforços conjuntos em pesquisa e desenvolvimento entre a acadêmia e a industria para VANETs têm tido um avanço considerável nos últimos anos. Já estão disponíveis

comercialmente algumas plataformas de pesquisa e desenvolvimento para VANETs provendo os subsídios necessários para testes em campo dessa tecnologia. Na Tabela 1 é apresentado os principais fornecedores de módulos de rádio DSRC e na Tabela 2 estão listados os principais fornecedores de plataformas de pesquisa e desenvolvimento para VANETs e os respectivos recursos disponíveis.

Tabela 1 – Principais fornecedores de módulos DSRC para VANETs.

Fornecedor	Transceptor de Rádio Frequência	Processador de comunicação
NXP	TEF510x	SAF510x
Autotalks	PLUTON (ATK3100B0)	CRATON (ATK4100A1)
Qualcomm	VIVE QCA65x4	

Fonte: adaptado de Abboud, Omar e Zhuang (2016, p. 9465).

Tabela 2 – Principais fornecedores de plataformas de pesquisa e desenvolvimento para VANETs.

Fornecedor da plataforma	**Modelo da plataforma**			**Fornecedor do módulo DSRC**	**Padrões suportados**			
	OBU	**RSU**	**Portável**		**IEEE WAVE**	**ETSI ITS**	**ARIB STD-T109**	**SAE J2537**
Arada Systems	LocoMate OBU	LocoMate RSU	LocoMate ME	Qualcomm	Sim	Não	Não	Sim
Autotalks	PANGEA4	-	-	Autotalks	Sim	Sim	Sim	Não
Cohda Wireless	MK5-OBU	MK5-RSU	-	NXP	Sim	Sim	Não	Sim
Kapsch TafficCom	EVK-3300 e TS3306	MTX-9450	-	"não revelado"	Sim	Sim	Não	Sim
Savari Networks	MobiWAVE	StreetWAVE	-	Qualcomm	Sim	Sim	Não	Sim

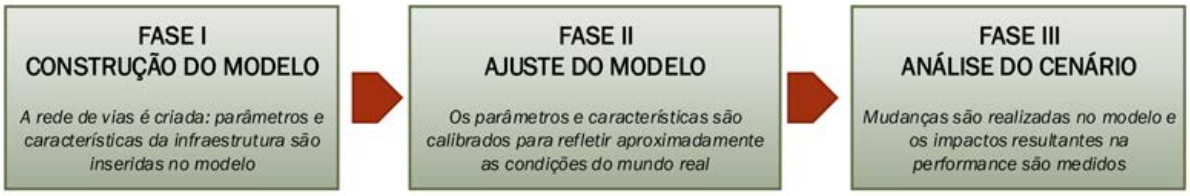
Fonte: Abboud, Omar e Zhuang (2016, p.9466).

2.1.2 Modelagem de Cenários para Simulações de Tráfego

Na Figura 5, estão representadas as fases do processo para a construção do cenário de simulação para tráfego. Na Fase I, o primeiro passo para modelar o cenário é a criação da rede de vias. Uma vez criada, as características específicas são inseridas, por exemplo, a largura e quantidade de faixas, cruzamentos, geometria das faixas e infraestrutura viária (semáforos e indicação de sinalização). Por fim, a modelagem do tráfego é realizada com a inserção dos veículos e pedestres. Na Fase II, os parâmetros são calibrados para replicar o comportamento do mundo real. Quanto maior o nível de detalhes, mais preciso será o modelo. Parâmetros como a velocidade máxima nas vias, modelagem das conversões em cruzamentos, fluxos de veículos e temporização dos semáforos são finamente ajustados. A partir dessa etapa, já é possível mensurar o quão próximo da realidade o modelo está e se será necessário mais ajustes. Para concluir, na Fase III, são realizadas mudanças no

cenário, com foco na característica da solução de mobilidade que se deseja implantar para mensurar os impactos causados por estas.

Figura 5 – Fases fundamentais do princípio geral para simulações típicas de tráfego veicular.



Fonte: adaptado de Campbell, Alexiadis e Krechmer (2016, p. 11).

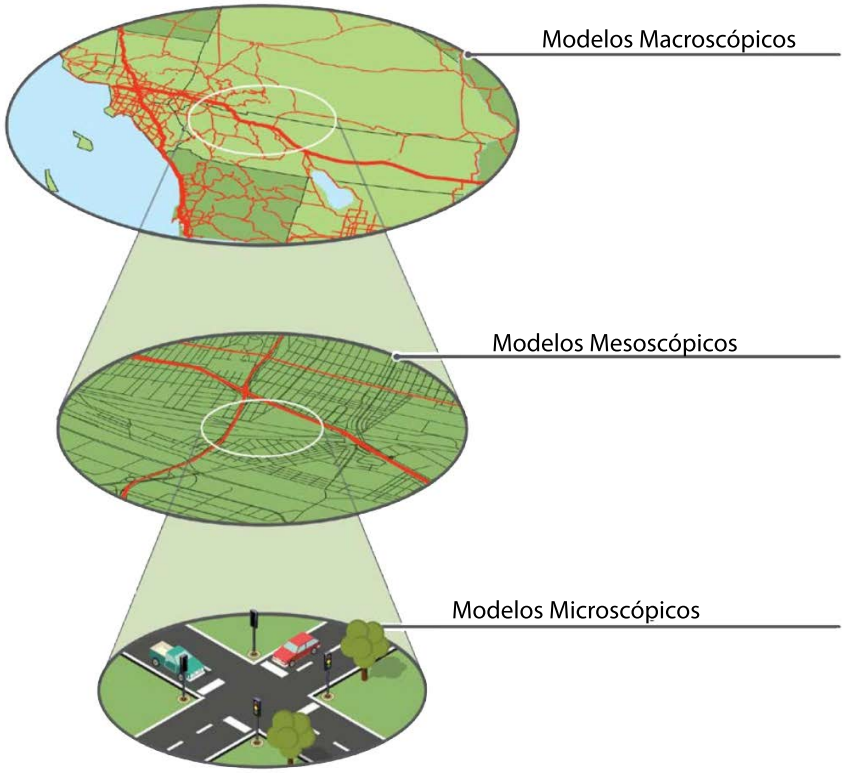
Na Figura 6, estão representados os níveis de detalhamento para os modelos de mobilidade. No nível macroscópico, há deficiência na captura de interações detalhadas entre veículos que são necessárias para simulações em redes veiculares. Contudo, modelos no nível macroscópico podem ser utilizados em conjunto com modelos específicos para redes veiculares ou para aproximar os impactos dessas. No nível mesoscópico, a modelagem está limitada pelo nível de detalhes nos veículos, incluindo o fluxo de veículos e mudança de faixa. Estes níveis de detalhes são plausíveis para a modelagem em nível regional de impactos das estratégias em redes veiculares, incluindo mudança dinâmica de rotas. Por fim, no nível microscópico, são capturadas interações detalhadas entre veículos, como, por exemplo, as características dos condutores e vias. Este é o método mais apropriado para simular os impactos das estratégias da comunicação V2X.

2.1.3 Simuladores para Redes Veiculares

Na literatura, encontram-se, em geral, as estruturas representadas na Figura 7 para simuladores de redes veiculares. Cada estrutura pode ser utilizada para tratar um problema específico. Na Figura 7a, primeiramente é realizado a simulação de mobilidade e um repositório com as informações capturadas é criado e em um segundo momento, essas informações são utilizadas pelo simulador de redes. Desta forma, os simuladores de mobilidade e de redes são completamente desacoplados. Enquanto essa abordagem somente é apropriada para certos tipos de aplicações para ITS, outras aplicações tem impacto direto nos movimento dos veículos (ROS; MARTINEZ; RUIZ, 2014), por exemplo aplicações de segurança (*safety*) e de planejamento dinâmico de rotas. Para resolver essa questão, foram adotadas mais duas estruturas, representadas nas Figuras 7b e 7c.

Para os simuladores com estruturas bidirecionais e parcialmente acoplados, são necessários a sincronização e o controle entre os simuladores de mobilidade e de redes. Esse papel é realizado por uma terceira entidade denominada controlador. Já para os simuladores bidirecionais acoplados (Figura 7c), todas as operações são realizadas internamente, sem a necessidade do controlador. Dessa forma, todos os modelos envolvidos estão sobre

Figura 6 – Modelos em potencial para simulação de mobilidade para redes veiculares.



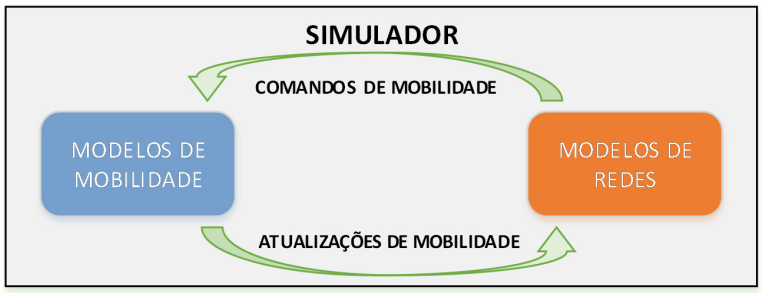
Fonte: adaptado de Campbell, Alexiadis e Krechmer (2016, p. 14).

a tutela de uma única entidade. Neste caso, é uma tarefa complexa e trabalhosa se obter um simulador robusto e que tenha a capacidade de modelar o mundo real, ao contrário dos simuladores com estruturas parcialmente acopladas (Figura 7b), onde a complexidade está no controlador, pois simuladores bem estabelecidos na literatura são utilizados para compor esse modelo. Os principais simuladores conhecidos na literatura serão abordados na Seção 2.5.

Figura 7 – Relação entre simuladores de mobilidade e simuladores de redes utilizados para VANETs.

(a) Unidirecional desacoplados.

(b) Bidirecional parcialmente acoplados.



(c) Bidirecional acoplados.

Fonte: adaptado de Ros, Martinez e Ruiz (2014, p. 13).

2.2 Tecnologias Candidatas para VANETs

Tecnologias de comunicação caracterizam uma linha de pesquisa proeminente em VANETs. Diferentes tecnologias candidatas são apresentadas na Tabela 3. O padrão IEEE 802.11p é o mais difundido, por ter sido concebido para suportar comunicações V2V e V2I. Contudo, há limitações quanto ao alcance e a capacidade da infraestrutura, principalmente em ambientes com alta densidade de veículos. Outras tecnologias para redes móveis, como, por exemplo, as redes UMTS *(Universal Mobile Telecommunications System)* e LTE *(Long Term Evolution)*, não atendem aos requisitos para a implementação de comunicações V2V. Desta forma, alguns pesquisadores propõem arquiteturas híbridas para VANETs capazes de atender plenamente os requisitos de comunicação. Por outro lado, a tecnologia LTE-A *(LTE Advanced)* mostra-se uma candidata promissora, pois provê além de ampla cobertura com baixa latência e alta largura de banda, o recurso de comunicação

D2D *(Device-to-Device)*, capaz de suportar a comunicação V2V em VANETs.

Tabela 3 – Principais tecnologias de comunicação candidatas para uso em VANETs.

	Wi-Fi	**802.11p**	**UMTS**	**LTE**	**LTE-A**
Largura do canal	20 MHz	10 MHz	5 MHz	1,4, 3, 5, 10, 15, 20 MHz	Up to 100 MHz
Banda(s) de Frequência	2,4 GHz, 5,2 GHz	5,86–5,92 GHz	700–2600 MHz	700–2690 MHz	450 MHz–4,99 GHz
Bitrate	6-54 Mb/s	3–27 Mb/s	2 Mb/s	Up to 300 Mb/s	Up to 1 Gb/s
Alcance	Até 100 m	Até 1 km	Até 10 km	Até 30 km	Até 30 km
Capacidade	Média	Média	Baixa	Alta	Muito alta
Cobertura	Intermitente	Intermitente	Ubíqua	Ubíqua	Ubíqua
Suporte para mobilidade	Baixa	Média	Alta	Muito alta (até 350km/h)	Muito alta (até 350km/h)
Suporte para QoS	Enhanced Distributed Channel Access (EDCA)	Enhanced Distributed Channel Access (EDCA)	Classes QoS e seleção da portadora	QCI e seleção da portadora	QCI e seleção da portadora
Suporte a *broadcast/ multicast*	*Broadcast* nativo	*Broadcast* nativo	Através de MBMS	Através de eMBMS	Através de eMBMS
Suporte V2I	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Suporte V2V	Nativo (ad hoc)	Nativo (ad hoc)	Não	Não	Potencial (através de D2D)
Penetração no mercado	Alta	Baixa	Alta	Alta	Alta (Potencial)

Fonte: adaptado de Araniti et al. (2013, p. 151).

Em Araniti et al. (2013), é realizado um levantamento sobre tecnologias de comunicação para arquitetura de redes V2I, somente com a utilização de redes móveis LTE. São discutidos aspectos para padronização do método proposto e analisados os pontos fortes e desvantagens da tecnologia LTE em VANETs, frente a tecnologias convencionais utilizando o padrão IEEE 802.11p. Por fim, o autor traz a reflexão sobre o potencial da tecnologia em questão, principalmente no que tange à comunicação D2D proporcionada pelo advento das redes LTE-A. Entretanto em Zheng et al. (2015) o uso do recurso D2D para comunicação V2V é analisado de forma mais criteriosa, onde é demonstrado que devido a alta velocidade dos veículos os requisitos de tempo para aplicações de segurança *(safety)* não são cumpridos.

Além da arquitetura convencional, utilizando DSRC para a comunicação V2V e para V2I através de RSUs, conforme definido na Subseção 2.1.1, existem arquiteturas que combinam mais de uma tecnologia de comunicação, sendo denominadas de arquiteturas híbridas. Em Zheng et al. (2015), é introduzido o termo HetVNETs *(Heterogeneous Vehicular Networks)* para designar arquiteturas híbridas, compostas pela tecnologia DSRC em conjunto com LTE. Um levantamento sobre as tecnologias heterogêneas é realizado juntamente com uma discussão detalhada. Os autores abordam questões sobre os novos desafios que a arquitetura heterogênea impõe, tais como estratégias de *handover*, *big data*, concepção de camadas cruzadas e computação em nuvem veicular.

Em Abboud, Omar e Zhuang (2016), é realizado um levantamento extensivo sobre comunicações V2X para arquiteturas híbridas, semelhante à Zheng et al. (2015), composta pelo padrão IEEE 802.11p e redes móveis. Tecnologias comerciais já disponíveis no mercado para a industria automobilística são analisadas. Por fim, algumas questões em aberto são mencionadas para estudo, como, por exemplo, o desenvolvimento de ferramentas específicas para simulação de VANETs com arquiteturas híbridas.

A comunicação V2V é o principal foco em Nshimiyimana, Agrawal e Arif (2016). É feito um paralelo entre a utilização de DSRC, com as suas limitações técnicas, e entre D2D, com as suas vantagens.

Em Kazmi, Khan e Akram (2016), é proposta uma arquitetura para VANETs utilizando conceitos de SDN *(Software-Defined Networking)*. Foi introduzido o termo SDVANET *(Software Defined VANET)*. O principal objetivo dos autores foi superar a sobrecarga na performance de arquiteturas convencionais, como, por exemplo, a de escalabilidade. A arquitetura de rede foi dividida em módulos menores, denominados domínios e distribuídos em blocos conectados através de um controlador central. Para validar a arquitetura proposta, um módulo para simulações em SDN foi integrado ao *framework* de simulação Veins e foram realizadas simulações em cenários não realísticos de rodovias.

2.3 Protocolos de Roteamento

Uma vasta quantidade de protocolos e algoritmos de roteamento tem sido desenvolvidos para atender problemas específicos em redes sem fios (DUGAEV et al., 2015), como, por exemplo, VANETs. Neste caso particular, desenvolver um protocolo de roteamento robusto é uma tarefa complexa, pois a mudança frequente da topologia e a alta mobilidade dos nós são características particulares e dificultadoras. Dito isto, o desenvolvimento de um protocolo de roteamento que seja abrangente o suficiente para atender todas as particularidades de VANETs é uma tarefa desafiadora.

Em Bhoi e Khilar (2014), um levantamento elucidador dos tipos de protocolos de roteamento existentes é realizado. Os protocolos de roteamento são divididos por classes baseados em: topologia, posição, *clusters*, geolocalização e *broadcast*. Foram listados vários protocolos com as suas respectivas descrições.

Em Dugaev et al. (2015), é realizado uma análise de diferentes protocolos para MANET *(Mobile Ad hoc Network)*. Os protocolos analisados foram AODV *(Ad-Hoc On demand Distance Vector)*, DSDV *(Destination Sequenced Distance Vector)*, OLSR *(Optimized LinkState Routing)* e DSR *(Dynamic Source Routing)*. Tendo uma melhor performance o DSR. Vale comentar que VANETs são um caso particular de MANET e assim sendo, a análise realizada pelo autor se aplica de maneira satisfatória para VANETs.

2.4 Aplicações para ITS

Em Johri et al. (2016), é realizada uma análise para diferentes categorias de aplicações para CAV *(Connected and Automated Vehicles)* a partir de um escala espaço-temporal dos requisitos de comunicação. Também são analisados os limites da capacidade das diferentes alternativas de tecnologia sem fio para VANETs. As aplicações são categorizadas em quatro grupos: segurança (*safety*) ativa, economia de combustível e controle de emissão, automação de veículos conectados e *infotainment*. Seguem alguns exemplos de aplicações:

1. Segurança ativa
    a) PCS *(Pre-Crash Sensing)*: utilizado na preparação do veículo para acidentes iminentes e inevitáveis.
    b) CCW *(Collaborative Collision Warning)*: coleta informações dos veículos nas proximidades e informa ao condutor quando uma colisão é provável ou quando ocorreu.
    c) CSW *(Curve Speed Warning)*: adverte ao condutor quando a velocidade está acima do limiar de segurança em uma curva.
2. Economia de combustível e controle de emissão
    a) LEZ *(Low Emission Zone)*: permite que veículos híbridos operem em modo de emissão de poluentes mínima em zonas pré-determinadas.
    b) FEP *(Fuel-Economy-oriented trip Planning)*: planeja a utilização eficiente dos recursos do veículo baseado em um trajeto pré-definido pelo condutor.
    c) *Start-stop*: desliga temporariamente o motor do veículo em situações de parada, como por exemplo em um semáforo na fase vermelha.
3. Automação de veículos conectados
    a) AVT *(Adaptive Vehicle Tuning)*: ajusta em tempo real e automaticamente a operação do veículo baseado nas condições de tráfego e das vias.
    b) TJA *(Traffic Jam Assist)*: habilita a condução autônoma do veículo em situações de congestionamento.

c) AP *(Automated valet/street Parking)*: estaciona o veículo de forma autônoma sem a interferência dos condutores.

4. Entretenimento informativo

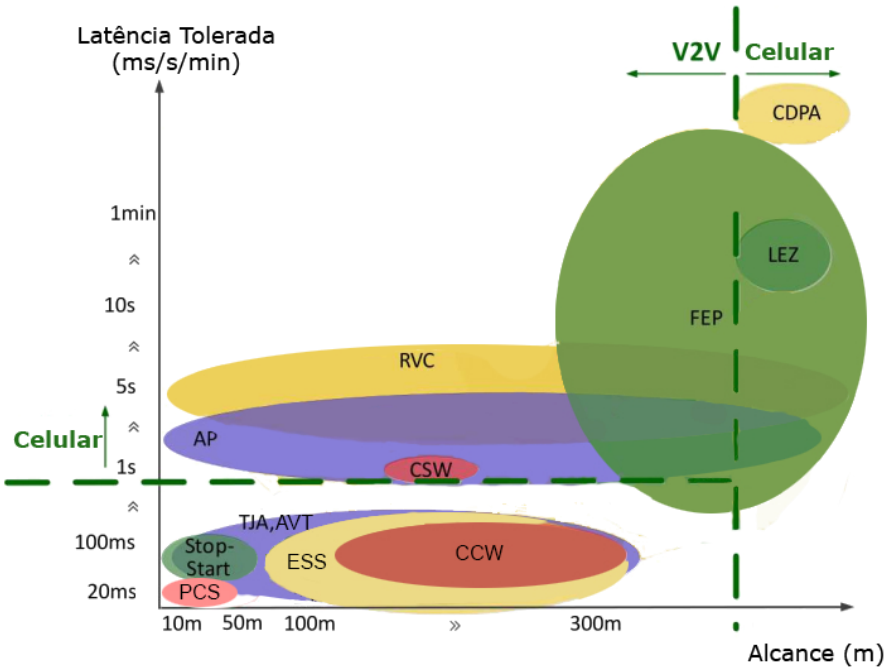
a) RVC *(Remote Vehicle Command)*: uma aplicação móvel capaz de enviar comandos remotamente ao veículo para, por exemplo, acionar o motor, climatização e sistemas de travamento das portas.

b) ESS *(Extended Surrounding Sensing)*: coleta de forma colaborativa informações sobre condições climáticas e das vias para auxiliar a condução e controle dos veículos.

c) CDPA *(Cloud-based Diagnostics/Prognostics/Analytics)*: dados são coletados periodicamente relativos ao estado do veículo, tais como parâmetros do motor, economia de combustível, códigos de diagnósticos sobre defeitos e estado dinâmico do veículo (por exemplo, localização, título, velocidade e aceleração).

Na Figura 8, é representada a análise realizada por Johri et al. (2016) das aplicações apresentadas. As aplicações são classificadas de acordo com os requisitos de tempo e abrangência. Desta forma, os autores conseguiram representar os limites para o uso de diferentes tecnologias de comunicação. Por exemplo, a aplicação CCW requer uma baixa latência e abrange os veículos em um raio de até 300 metros. Assim, a tecnologia para redes celulares não é a mais adequada. Já no caso da aplicação CDPA, são necessárias uma maior abrangência e tolerância a grandes latências, o que justifica o uso de redes celulares.

Figura 8 – Uma perspectiva espaço-temporal de aplicações para CAV.



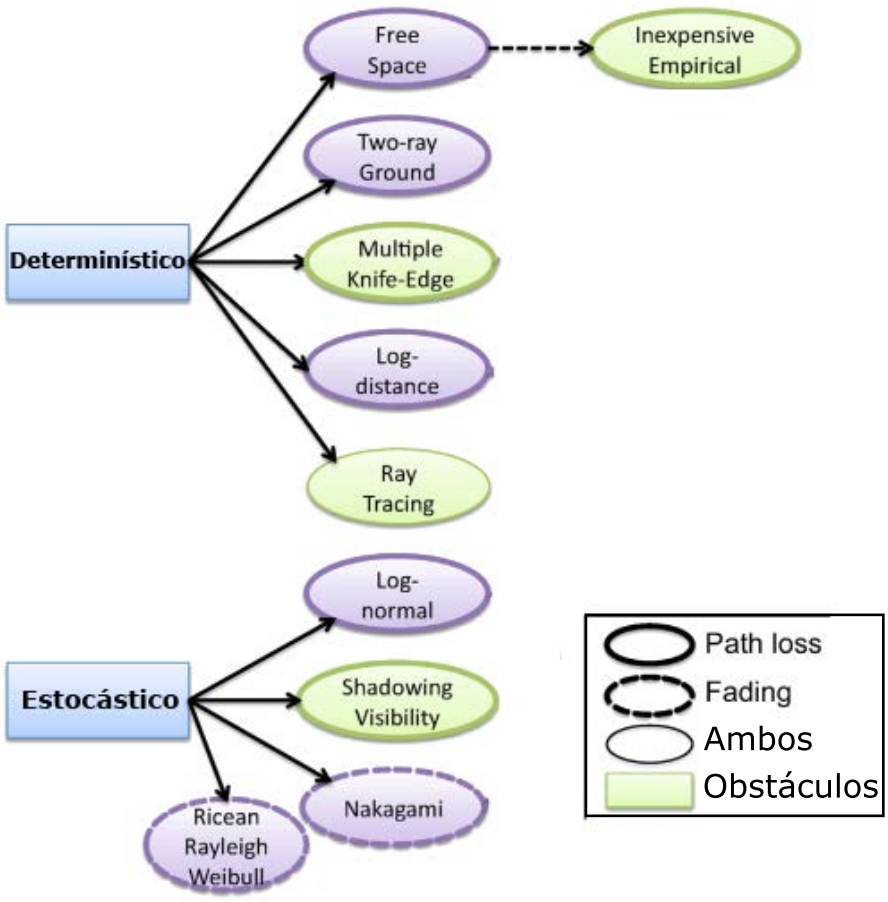
Fonte: Johri et al. (2016, p. 5).

2.5 Simuladores

Testes reais em VANETs são custosos e requerem uma quantidade considerável de recursos e incentivos para serem executados. Os simuladores são opções mais tangíveis e acessíveis para a validação de modelos e métodos. Contudo, esses devem atender a pré-requisitos essenciais visando a obtenção de resultados com um alto grau de semelhança ao mundo real, tais como modelos de propagação realísticos, modelagem da mobilidade de cenários reais e modelagem dos padrões e tecnologias utilizadas em VANETs.

Na Figura 9, os modelos de propagação utilizados em simuladores para VANETs são apresentados e classificados em dois grupos: determinísticos e estocásticos. O segundo grupo provê resultados realísticos. Pode-se, também, utilizar mais de um modelo em simulações mais complexas. Por exemplo, combinar o modelo determinístico *Free Space* e o *Shadowing Visibility* em simulações de ambientes urbanos onde a interferência de edifícios na propagação de sinais é um fator crítico.

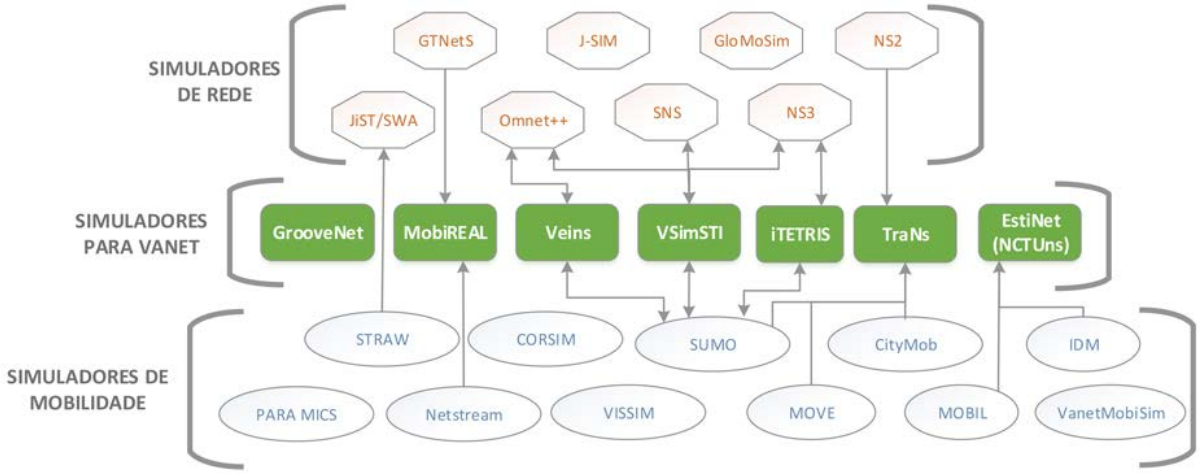
Figura 9 – Taxonomia de modelos de propagação de sinais sem fio para VANETs.



Fonte: adaptado de Ros, Martinez e Ruiz (2014, p. 3).

Em Ros, Martinez e Ruiz (2014), é realizado um levantamento extensivo dos simuladores para VANETs. É feita uma análise detalhada levando em consideração os principais aspectos para a escolha assertiva do simulador, dadas as características específicas do problema a ser tratado. Já em Mussa et al. (2015), é feito um levantamento acerca dos simuladores mais utilizados em VANETs e as respectivas descrições de suas capacidades. A Figura 10 ilustra os principais simuladores para VANETs com as respectivas relações entre os simuladores de redes e de mobilidade. Nota-se que alguns simuladores podem acoplar um ou mais simuladores de redes e/ou de mobilidade.

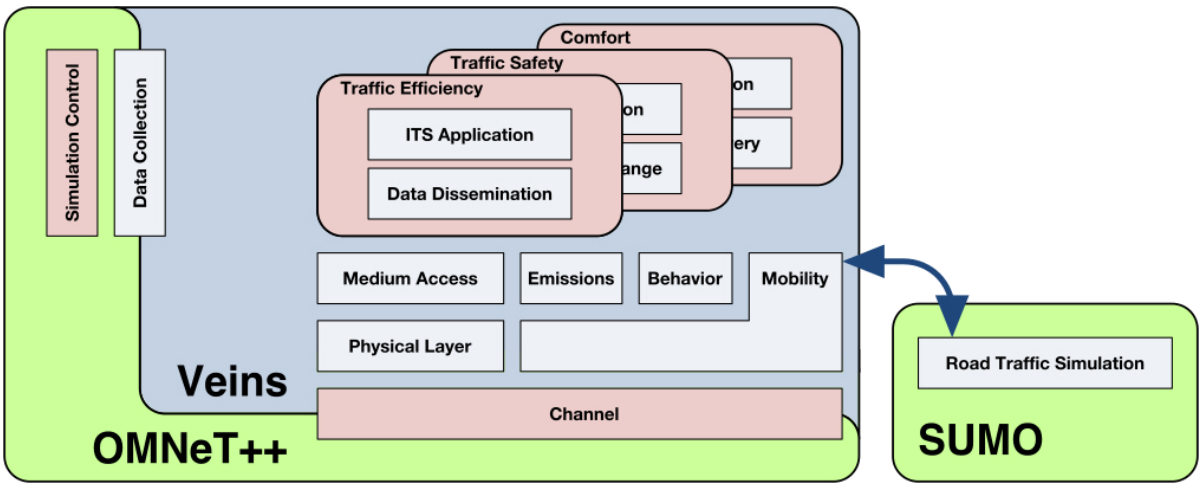
Figura 10 – Taxonomia de simuladores para VANETs.



Fonte: adaptado de Mussa et al. (2015, p. 2) e Ros, Martinez e Ruiz (2014, p. 7).

Na Tabela 4, estão relacionados os simuladores para VANETs mais difundidos e suas respectivas características. O *framework* de simulação Veins é amplamente utilizado na literatura (SOMMER; GERMAN; DRESSLER, 2011). O seu conjunto de características é um ponto favorável para a sua escolha, principalmente por ser de código aberto, permitindo assim, extensões no código. Outra característica importante a sua estrutura, composta pela integração de dois simuladores consolidados na literatura: o OMNet++ como simulador de redes e o SUMO *(Simulation of Urban MObility)* como simulador de mobilidade, conforme indicado na Figura 11.

Figura 11 – Arquitetura do *framework* Veins para simulação de VANETs.



Fonte: Veins Website (2017).

Para esta dissertação o Veins foi escolhido para a realização das simulações em VANETs. O seu conjunto de características favoráveis foi um ponto forte na escolha, por exemplo, a comunicação em tempo de execução entre o simulador de redes e o simulador de mobilidade, permitindo assim, a avaliação de aplicações de planejamento dinâmico de

Tabela 4 – Simuladores para redes veiculares.

	Groove Net	**TraNS**	**EsiNet (NC-TUns)**	**iTETRIS**	**VSimRTI**	**Veins**
Multi plataforma	✗	✗	✗	✗	✓	✓
Software livre	✓	✓	✗	✗	✗	✓
Código aberto	✓	✓	✗	✗	✗	✓
Linguagem	C++	Java, C++	C++	Java, C++ ou Python	Java	C++
Documentação	✗	✓	✓	✓	✓	✓
Exemplos	✗	✓	✓	✓	✓	✓
Atualizações	✗	✗	✓	✓	✓	✓
Console	✗	✗	✗	✓	✓	✓
GUI	✓	✓	✓	✗	✓	✓
Instalação	++	++	+++	-	+++	++
Usabilidade	++	++	++	-	++	++
Escalável	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Redes Móveis	✗	✗	✗	✗	VSimRTI Cell Simulator	Veins LTE
SDN	✗	✗	✓	✗	✗	✗
Modelos de propagação realísticos	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Fonte: adaptado de Mussa et al. (2015, p. 2))

rotas. Outra característica favorável para a escolha do Veins foi a sua extensão Veins LTE, na qual viabilizou as simulações com tecnologia de comunicação LTE entre os veículos. Contudo o Veins não implementa o padrão IEEE 1609.2 que define os serviços de segurança *(security)* no padrão WAVE, portanto, este tópico não é parte integrante do escopo desta dissertação.

2.6 Trabalhos Relacionados

Nesta seção, serão apresentados os trabalhos que, de alguma forma, tem objetivos semelhantes aos desta dissertação.

Em Noori e Valkama (2013), é realizado um estudo focado na eficiência do tráfego

de veículos, tendo como principais objetivos a diminuição do tempo de trajeto de cada veículo, utilizando-se conceitos de DRP *(Dynamic Route Planning)*, a redução de consumo de combustível e a consequente diminuição de emissão de CO2. Para atingir tais objetivos, os autores propõem um método para calcular o tempo de viagem momentâneo para cada via e assim, realizar o planejamento dinâmico de rotas para os veículos de interesse. Para a execução dessas etapas, foi implementado um algoritmo em Python que, por sua vez, é integrado ao SUMO. Os autores utilizaram um repositório de dados de tráfego da cidade de Colônia, Alemanha. O cenário tem aproximadamente 400 km² com trajetos para cerca de 700 mil veículos monitorados por 24 horas. A seguinte metodologia foi seguida:

1. Primeiramente, para avaliar o impacto do método proposto, foi considerado o horário entre 6:00 AM e 8:00 AM. Duzentos e cinquenta mil veículos circularam neste período. Vinte zonas, com diferentes densidades de veículos, foram selecionadas no horário de 7:00 AM e um veículo monitorado foi adicionado em cada zona;

2. Para a obtenção dos dados foram realizadas as seguintes simulações:

    a) Com o cenário supracitado somente com os 20 veículos monitorados em condições ideais;

    b) Com o tráfego real, cerca de 250 mil veículos, e os 20 veículos monitorados no horário considerado sem a implantação do ITS;

    c) Com o tráfego real e com a implantação do ITS para os 20 veículos monitorados;

    d) Com o tráfego real, com a implantação do ITS para os 20 veículos monitorados e com VANETs, através do *framework* Veins. Neste caso, todos os veículos no cenário utilizavam o padrão 802.11p para comunicação V2V e várias RSUs foram inseridas nos percursos dos veículos monitorados para a comunicação V2I. Todos os nós (veículos e RSUs) disseminavam *beacons* com a frequência de 10 Hz. O tempo de trajeto momentâneo para cada via passou a ser calculado da seguinte maneira: a RSU no início da via recebia a informação da hora de entrada dos veículos na via e a RSU no final da via recebia a hora de saída dos veículos. Desta maneira, o tempo de trajeto momentâneo para a via era atualizado com a média do tempo de trajeto dos cinco últimos veículos. Adicionalmente, o PDR *(Packet Delivery Rate)* foi monitorado.

A solução proposta pelos autores obteve uma diminuição, para os 20 veículos monitorados, de 52% em média no tempo total de trajeto e 48% no consumo médio de combustível. Também foi constatado que, em áreas com maiores densidades de veículos, o PDR sofre reduções de maneira significativa. Contudo, os autores somente realizaram o monitoramento de 20 veículos em meio a 250 mil. A avaliação do impacto do ITS proposto foi limitado aos 20 veículos monitorados, não evidenciando uma melhora global no tráfego

do cenário analisado. Somado a este fato, não ficou evidente a repetição das simulações para garantir a segurança estatística necessária para simulações deste gênero. Por fim não foi avaliada a latência fim-a-fim para analisar o comportamento da arquitetura de comunicação utilizada no estudo a fim de constatar se os requisitos de latência definidos na literatura, para o tipo de aplicação utilizada, foram cumpridos.

Em Arellano, Mahgoub e Ilyas (2014) é proposto um algoritmo que implementa uma solução para DTA *(Dynamic Traffic Assignment)* em VANETs. Outra contribuição foi a implementação de extensões para o Veins complementando as funcionalidades de integração com o TraCI *(Traffic Control Interface)*, que, por sua vez, é utilizado pelo SUMO. O intuito das extensões é permitir que os autores validem o método proposto. Há uma função no Veins para alterar rota do veículo baseado na localização da via e no tempo adicionado ao trajeto, caso a rota do veículo contenha a via em questão. O autor implementou duas funções para desassociar essas informações, ou seja, implementou uma função somente para alterar o tempo de trajeto de vias e outra para somente alterar a rota do veículo. Desta maneira é possível atualizar o tempo de trajetos de várias vias antes de decidir pela mudança de rota. O principal objetivo do autor é melhorar a eficiência de tráfego com o auxílio de VANETs. Para tal, ele utiliza o conceito de S-UE *(Stochastic User Equilibrium)*, onde cada veículo considera que pode melhorar o seu tempo de trajeto unilateralmente alterando sua rota baseado em informações completas sobre a rede de vias. A rede de vias é representada por um grafo, onde o custo de cada aresta é representado por um vetor estocástico dos tempos de trajetos constatados pelos veículos que trafegaram pela a via em questão. O algoritmo proposto pelos autores utiliza um parâmetro denominado tap *(transmit aggregation period)*, que é definido como o intervalo de tempo entre observações da velocidade média para cada veículo. O cenário para a simulação é uma rede de vias artificiais *(manhattan grid)* com 4 vias verticais e 4 vias horizontais, distantes 200 metros. É utilizado um fluxo de 1000 veículos saindo de um mesmo ponto de origem para um mesmo ponto de destino. O método proposto pelo autor é implementado da seguinte maneira:

1. A cada tap, a velocidade média de cada veículo é observada.

2. Caso a velocidade média observada esteja abaixo de um determinado limiar, o veículo em questão transmitirá uma mensagem com a informação de indicativo de incidente. A disseminação das mensagens se dá através de *broadcast*. As mensagens contêm os dados sobre a via onde o veículo se encontra e o tempo de trajeto estimado para a via onde o indicativo de incidente foi gerado.

3. Os veículos que recebem a mensagem sobre o incidente aguarda um período de agregação para a recepção, permitindo que outras mensagens cheguem. Os tempos de trajeto estimados recebidos são armazenados na memória interna dos veículos como "tempos percebidos de trajeto"para a via onde a mensagem foi gerada. Nesta etapa,

é permitido o recebimento de mensagens sobre retenções no tráfego, ocasionados por congestionamentos em outras vias, em complemento à mensagem de indicativo de incidente.

4. Após o período de agregação para a recepção, os veículos que receberam a mensagem sobre o incidente executarão uma mudança de rota, se for encontrada uma rota com menor tempo e limpará os "tempos percebidos de trajeto".

O tempo de trajeto médio sem acidentes, para o cenário utilizado, foi de 121,74 s. Já com o método proposto, os autores conseguiram, respectivamente para taps de 5 s, 2 s e 1 s, os tempos médios de viagem de 151,82 s, 141,82 s e 136,18 s. Ou seja, para o tap de 1s o método proposto atingiu um valor próximo ao tempo médio sem acidentes. Nas simulações realizadas pelos autores somente foi utilizada a comunicação V2V e não foi considerado a interferência causada por edifícios na recepção das transmissões de sinais sem fio. Somado a esse fato o cenário escolhido pelos autores para avaliação do método proposto é pouco realístico e a análise dos resultados realizada pelos autores foi pouco criteriosa, não demonstrando o tempo médio de viagem com acidentes e sem a influência do algoritmo proposto. Por fim nenhuma métrica de rede foi avaliada pelos autores e não houve repetições dos experimentos para garantir a segurança estatística da análise.

Em Souza et al. (2016), é proposto um ITS denominado CHIMERA *(Congestion avoidance througH a traffIc classifcation MEchanism and a Re-routing Algorithm)*, fundamentado em princípios de VANETs. O CHIMERA procura melhorar a eficácia da utilização da rede de vias e tem como objetivo reduzir o tempo médio de trajeto dos veículos e os custos intrínsecos à locomoção por esse meio. O autor define AoI *(Area of Interest)* como sendo a microrregião onde uma instância do CHIMERA atua. O método proposto pelo autor tem a capacidade de detectar quando um congestionamento está se formando e balancear o tráfego através da distribuição da densidade de veículos, evitando assim retenções a curto prazo. A informação para o balanceamento do tráfego é composta pela quantidade de veículos em cada via e as respectivas velocidades médias. Essas informações são transmitidas periodicamente pelos veículos para a infraestrutura instalada na AoI. O CHIMERA realiza regularmente um ranking de congestionamento para cada via dentro da AoI e em seguida é aplicado um algoritmo para definir novas rotas específicas para cada veículo, se assim for conveniente. Como metodologia de avaliação, o autor realizou as simulações de tráfego no SUMO e controlou a gestão do tráfego através do TraCI. O cenário foi retirado do OpenStreetMap (2017) e exportado para o SUMO. Uma área com 5 km² foi selecionada em Manhattan, Nova Iorque, Estados Unidos. Simulações com as seguintes densidades de veículos foram realizadas: 250, 500, 1000 e 1500 veículos/km². Rotas aleatórias foram definidas para os veículos. Para mensurar o impacto da solução, o autor variou dois parâmetros: o intervalo de tempo em que o CHIMERA avalia a rede de vias e a cobertura da AoI. Os resultados mostraram uma redução de até 31% no tempo

médio de trajeto, de até 70% do tempo parado e de até 8% na distância média percorrida. Contudo o autor não utilizou nas simulações realizadas nenhum simulador de redes para VANETs, somente considerou a disseminação da informação de forma instantânea, ou seja, não avaliou o comportamento do CHIMERA levando em consideração as interferências na transmissão dos pacotes e suas respectivas latências fim-a-fim.

3 METODOLOGIA E RESULTADOS OBTIDOS

Tendo em mente o aprimoramento da mobilidade urbana por meio da tecnologia, esta dissertação realiza um estudo sobre a implantação de um ITS proposto para a RMR com o seu desempenho analisado em diferentes arquiteturas de comunicação para VANETs. Um trecho da Avenida Governador Agamenon Magalhães, parte integrante do corredor Norte-Sul da RMR, foi selecionado por ter um dos maiores fluxos de veículos e por ser considerado vital para a mobilidade da cidade do Recife. Foram escolhidas diferentes arquiteturas e tecnologias de comunicação para VANETs com o intuito de avaliar, na ocorrência de acidentes e/ou congestionamentos, os impactos na média do tempo total de trajeto dos veículos após a implantação do ITS. Para este estudo, foi considerado que os acidentes ocasionam o bloqueio total da via de interesse. Duas métricas de rede foram consideradas, quais sejam, a latência fim-a-fim e a taxa de entrega de pacotes, a fim de verificar se o desempenho das arquiteturas de comunicação propostas na implantação do ITS satisfaz aos requisitos definidos na literatura. Os resultados foram obtidos por meio de simulações realizadas com o Veins, em virtude de sua versatilidade e características favoráveis no desenvolvimento de aplicações para ITSs.

3.1 Modelagem dos Cenários Investigados

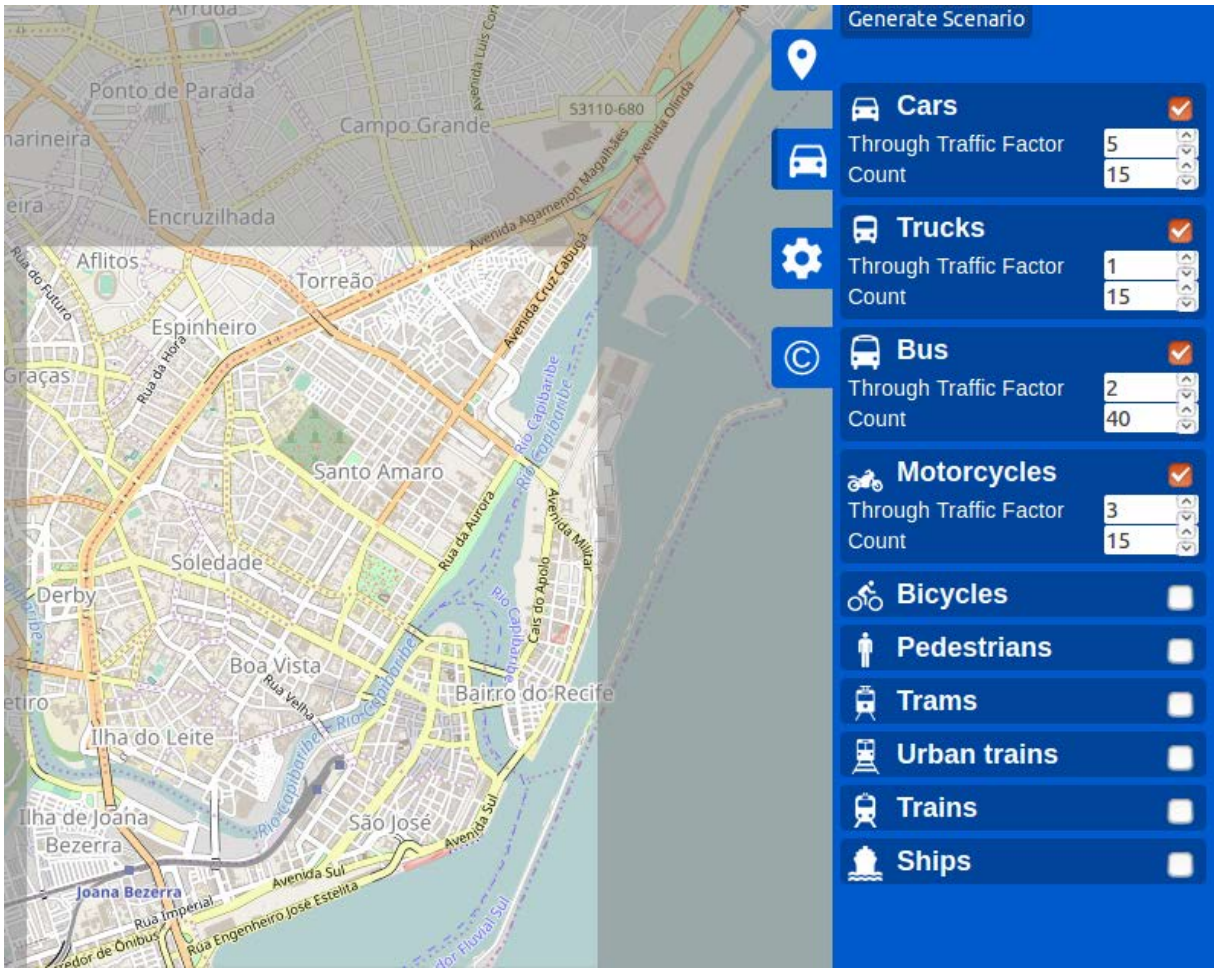
A modelagem dos cenários para simulação do ITS proposto foi dividida em duas etapas: a primeira referente à mobilidade urbana e a segunda para as arquiteturas e tecnologias de comunicação, conforme será explicado a seguir.

3.1.1 Mobilidade Urbana

A modelagem da rede de vias urbanas para a região selecionada foi feita mediante o uso do *OSM Web Wizard*, parte integrante do pacote de ferramentas do SUMO. A ferramenta permite a seleção da área de interesse por meio de uma interface Web que extrai as informações e os parâmetros da rede de vias e de edificações do OpenStreetMap (2017). Com esta ferramenta, também é possível determinar a densidade referente a cada tipo de veículo e estabelecer a ocorrência de viagens aleatórias dos veículos dentro do cenário selecionado. A Figura 12 mostra a região selecionada para este estudo com área aproximada de 25 km^2.

A modelagem do tráfego urbano foi realizada para cumprir os requisitos de modelos microscópicos (vide Figura 6). Para atingir esse objetivo, o tráfego utilizado nas simulações foi modelado a partir de dados reais do mês de maio de 2015, obtidos a partir do sítio da Prefeitura do Recife (Emprel, 2015). Todos os parâmetros de tráfego utilizados neste estudo foram calculados a partir dos dados retirados do sítio supracitado. A quantidade

Figura 12 – Trecho da RMR do Recife considerada para a realização do estudo (imagem extraída da ferramenta OSM Web Wizard).

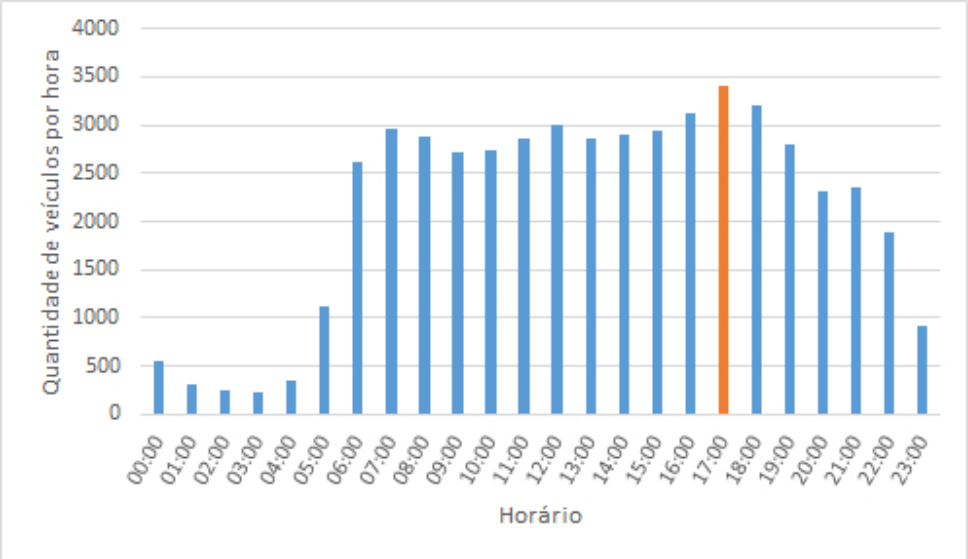


Fonte: o autor (2017).

de cada tipo de veículo presente na simulação foi gerada conforme dados retirados do sítio Prefeitura do Recife e segue a seguinte distribuição: automóveis de passeio (80%), motocicletas (16%), ônibus (3%) e caminhões (1%). Para a Avenida Gov. Agamenon Magalhães, principal via de acesso na região da cidade considerada deste estudo, um fluxo de veículos com rota pré-determinada e pontos de partida e chegada iguais foi modelado manualmente, com o intuito de criar as condições necessárias para a avaliação do ITS proposto e das arquiteturas de comunicação analisadas. O intervalo de uma hora entre 17 e 18 horas foi selecionado, uma vez que apresentou o maior pico de veículos no sentido Sul-Norte da via, conforme indicado na Figura 13.

A rede de vias urbanas exportada para o SUMO, com base nos dados contidos no OpenStreetMap (2017), não é precisa. Por essa razão, foi necessário ajustar manualmente o número de faixas em várias vias, assim como as conversões permitidas para cada cruzamento, o tempo das fases dos semáforos, a velocidade máxima permitida em cada via e as interseções com imperfeições. Na Figura 14 estão representados exemplos dos problemas supracitados. Várias simulações do tráfego foram necessárias para a identificação dos

Figura 13 – Média do fluxo de veículos por hora no mês de maio de 2015 na Av. Gov. Agamenon Magalhães no sentido Sul-Norte.



Fonte: Emprel (2015).

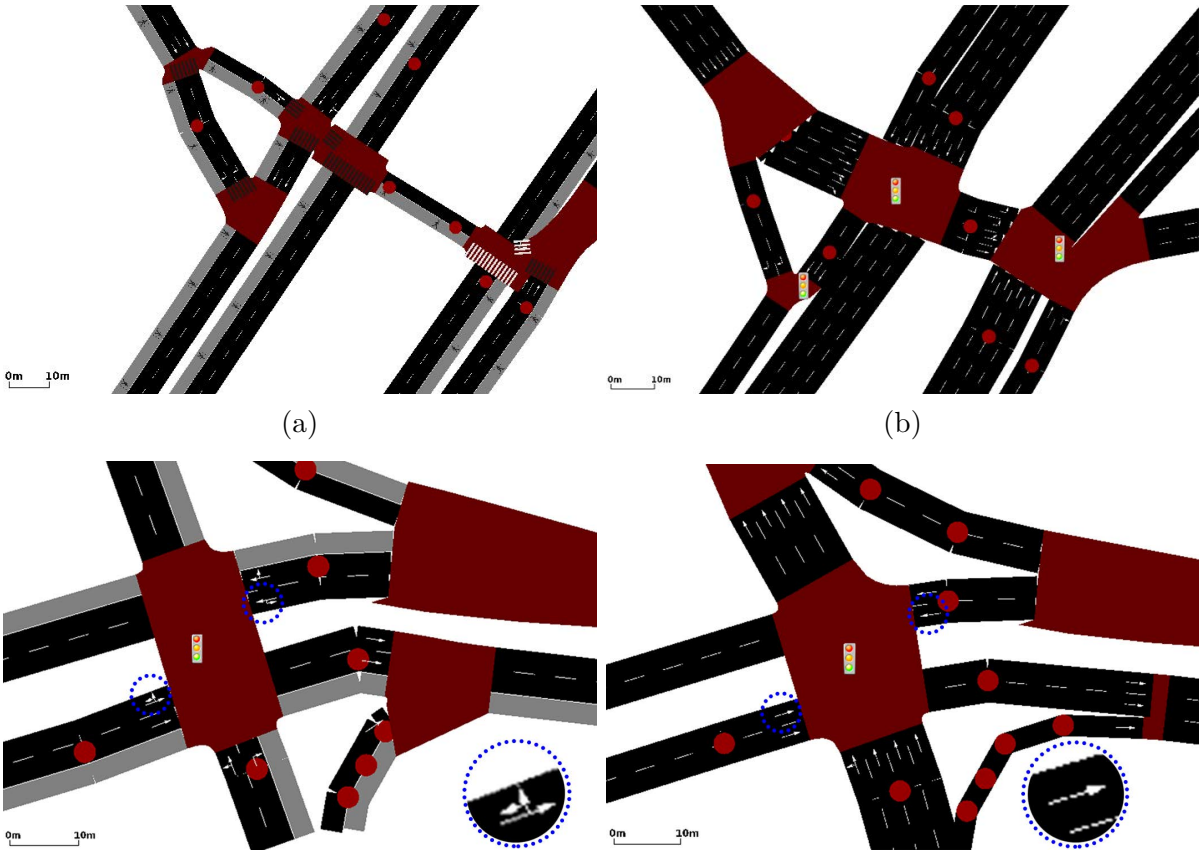
pontos onde ocorriam retenções para, em seguida, sanar os problemas. Essa etapa remete ao que foi exposto na Fase II, indicada na Figura 5.

Após os ajustes na rede de vias urbanas, o tráfego modelado na Fase I foi simulado no SUMO para avaliação. Um problema recorrente foi o impasse entre veículos, que tinha como consequência o bloqueio de uma ou mais faixas. A Figura 15 ilustra a questão mencionada acerca do bloqueio. Na parte inferior da referida figura, percebe-se que o ônibus A e o automóvel B desejam mudar simultaneamente de faixa para lados opostos, o que ocasiona o bloqueio de duas faixas na via principal e gera retenção do fluxo. A Figura 16 mostra uma das possíveis consequências deste problema, onde em questões de minutos um grande congestionamento é formado por conta de uma situação semelhante à ilustrada na Figura 15.

Para solucionar os impasses nas simulações, a identificação e a retirada manual dos veículos envolvidos foram necessárias. O SUMO é munido com um mecanismo para solucionar automaticamente esses impasses, chamado *teleport*. Se um veículo ficar parado por mais de 300 segundos, por padrão, este veículo é teleportado para o início da próxima via em sua rota. No SUMO as colisões são modeladas seguindo um modelo estocástico, ou seja, as colisões podem acontecer de maneira aleatória. Na detecção da ocorrência de colisões, o SUMO utiliza imediatamente o mecanismo de *teleport* para um dos veículos envolvidos na colisão. Na próxima subseção, será explicada em detalhes a razão da não utilização deste recurso.

Em Dias et al. (2013), é descrita a primeira etapa do projeto COSMO *(COllaborative System for Mobility Optimization)* composta pela modelagem do cenário de mobilidade de tráfego para a cidade de Coimbra, Portugal. Os autores se depararam com dificuldades

Figura 14 – Exemplos dos problemas enfrentados na exportação do cenário de mobilidade para o SUMO a partir do (OpenStreetMap, 2017).(a) e (b) representam, respectivamente, o Cruzamento entre a Av. Gov. Agamenon Magalhães e a Av. Rui Barbosa antes e após os ajustes realizados. (c) e (d) representam, respectivamente, o cruzamento entre a Av. Conde da Boa Vista e a Rua Dom Bosco antes e após os ajustes realizados e em destaque (círculos azuis) a sinalização das conversões permitidas.



(a) (b)

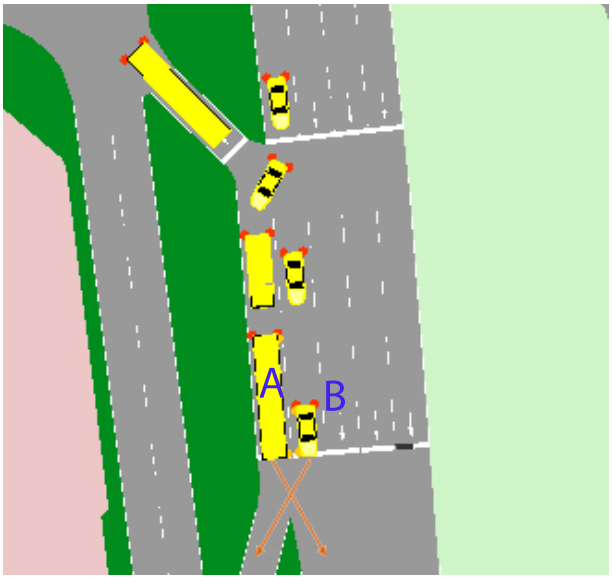
(c) (d)

Fonte: o autor (2017).

semelhantes às que foram descritas nesta dissertação. Várias iterações das simulações foram necessárias para solucionar os problemas na modelagem do cenário. Cada simulação foi realizada com 10000 veículos e a duração de cada simulação foi de cerca de 7 h. Os autores deixam evidente a complexidade de se modelar a mobilidade para cenários reais, onde a solução para um problema pode acarretar o surgimento de outros.

Uma vez concluída a modelagem do cenário para a mobilidade, o próximo passo é integrá-lo com o simulador de redes para realizar o estudo da implantação do ITS proposto. Uma das ações fundamentais do ITS proposto, que está descrito na Seção 3.2, é a definição dinâmica de rotas para cada veículo levando em consideração as condições do tráfego. Desta forma, não há como prever quais as rotas os veículos irão seguir sob a influência do ITS. Logo, mais ajustes nas redes de vias foram necessários após a implantação do ITS para obter resultados satisfatórios. Um outro fator que pode influenciar na fluidez

Figura 15 – Impasse entre veículos no simulador de mobilidade SUMO.



Fonte: o autor (2017).

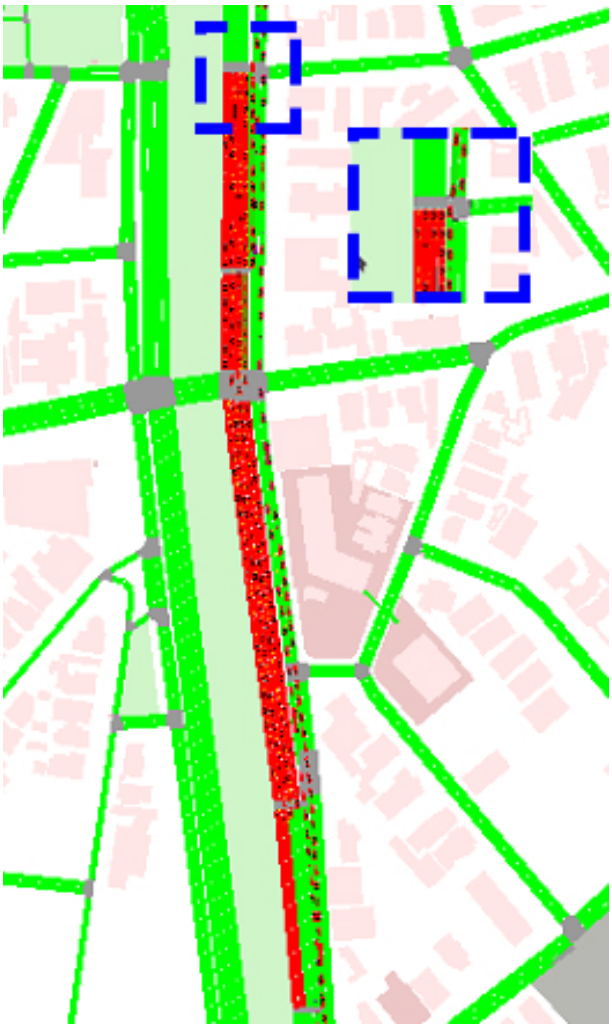
Figura 16 – Congestionamento causado pelo impasse entre veículos no simulador de mobilidade SUMO. Os veículos estão representados em vermelho.

Fonte: o autor (2017).

do tráfego é o nível de destreza e o grau de impaciência de cada condutor. No SUMO tais características podem ser parametrizadas. A destreza é modelada estocasticamente por uma escala entre 0 e 1, onde este valor é um dos fatores no cálculo da probabilidade do condutor transgredir as regras de tráfego e de segurança, por exemplo, fechando um cruzamento sem intenção ou trocar de faixa sem considerar a aproximação de outros veículos. A impaciência também é modelada estocasticamente por uma escala entre 0 e 1. O valor base para a impaciência é parametrizada para cada tipo de veículo na modelagem do

cenário de mobilidade, que por padrão é zero, e ao decorrer da simulação o valor é calculado dinamicamente considerando o valor base, o tempo de espera do condutor e o tempo máximo configurado para a impaciência atingir o seu valor mais alto, que por padrão é 300 segundos. A fórmula utilizada para esse cálculo é: ***MÁXIMO(0, MÍNIMO(1, impaciênciaBase + (tempoDeEspera*tempoMáximoParaImpaciência)))***. Na Figura 17 é demonstrado a formação de uma retenção, momentos após o início do acidente induzido no cenário, já sobre influência do ITS proposto, simplesmente pela falta de oportunidade dos condutores na via principal passarem para a via local devido ao intenso fluxo de veículos (quadrado pontilhado em azul). No final da Seção 3.4 está demonstrado o impacto da alteração dos fatores supracitados nos resultados das simulações.

Figura 17 – Retenção causada pela falta de oportunidade dos condutores na via principal passarem para a via local devido ao intenso fluxo de veículos (quadrado pontilhado em azul).



Fonte: o autor (2017).

3.1.2 Arquiteturas e Tecnologias de Comunicação

Para a análise realizada nessa dissertação, foram propostos três cenários de simulação com as seguintes arquiteturas de comunicação:

1. Somente com comunicação V2V usando o padrão WAVE. Tal cenário será denominado V2V.

2. Com comunicação V2X usando o padrão WAVE e RSUs como infraestrutura posicionadas empiricamente a cinco metros de altura, conforme representado na Figura 18 e que será denominado por V2X-RSU.

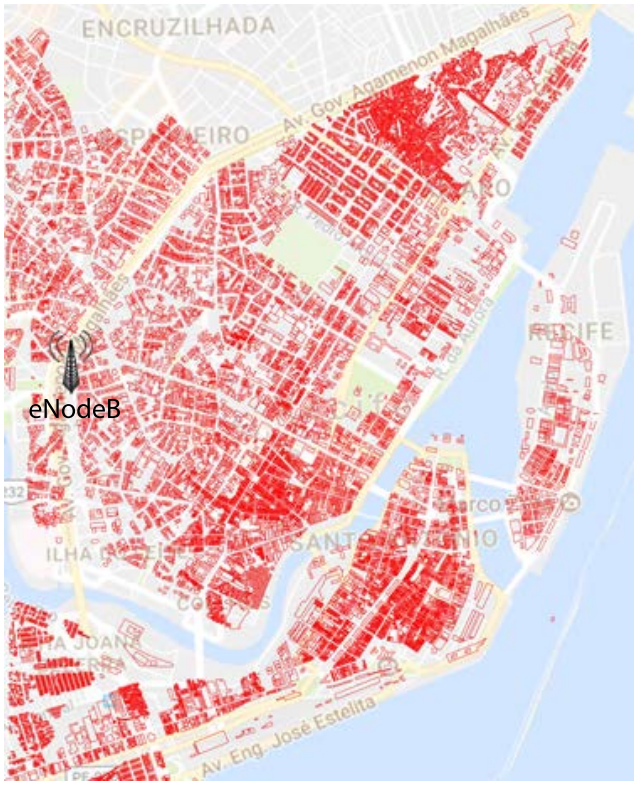
3. Com comunicação V2X usando uma arquitetura híbrida, composta pela tecnologia de comunicação DSRC implementando as comunicações V2V e por uma rede LTE, que possui somente uma eNodeB *(Evolved Node B)*, usada como infraestrutura e posicionada empiricamente a uma altura de 45 metros, conforme representado na Figura 19. Este último cenário será identificado por V2X-LTE.

Figura 18 – Trecho da RMR com indicação da localização das RSUs.

Fonte: o autor (2017).

Nas Figuras 18 e 19, estão representadas as edificações (em vermelho). Elas são levadas em consideração pelos modelos de propagação de sinais sem fios utilizados na simulação. Uma combinação de dois modelos foi utilizada nas simulações. O primeiro modelo é o *Simple Pathloss Model*, usado para modelar a atenuação do sinal em função da distância

Figura 19 – Trecho da RMR com indicação da localização da eNodeB.



Fonte: o autor (2017).

e da potência de transmissão em espaços abertos. O segundo modelo é o *Simple Obstacle Shadowing*, usado para modelar o efeito das edificações na recepção do sinal.

Originalmente, o Veins não oferece suporte a redes LTE. Desta forma, foi necessário utilizar a extensão Veins LTE 1.3 proposta por Hagenauer, Dressler e Sommer (2014). Assim, foi possível realizar as simulações do cenário V2X-LTE. A extensão Veins LTE 1.3 integra três módulos no OMNet++ 4.6, quais sejam, o Veins 2.2; o SimuLTE 0.9.1, para redes de telefonia celular, e o INET 2.3, responsável por funções de rede. O Veins LTE 1.3 somente é compatível com o SUMO 0.25.0.

Para os cenários V2V e V2X-RSU, o Veins 4.5 no OMNet++ 5.0 foi adotado. O Veins 4.5 é somente compatível com o SUMO 0.29.0. Os criadores e mantenedores do Veins (SOMMER; GERMAN; DRESSLER, 2011) aperfeiçoaram o código retirando o suporte ao INET 2.3 e criando um subprojeto denominado *veins_inet*, baseado no INET 3.4 e somente com as funções necessárias ao funcionamento do Veins. Desta forma, a execução das simulações nesta versão tornou-se mais eficiente. Se desativarmos as funções da rede LTE em um cenário com somente comunicação V2V, a simulação executada no Veins LTE 1.3, por exemplo, tem duração de 10 minutos. Por outro lado, se executarmos a mesma simulação no Veins 4.5, o tempo de simulação passa a ser algo em torno de 2 minutos. No caso de simulações em grande escala, o tempo de execução e os recursos computacionais necessários para a sua execução são de grande relevância, uma vez que podem atingir valores que inviabilizam a execução das simulações.

3.1.3 Limitações do Veins LTE 1.3

No Veins LTE 1.3, existem limitações que precisam ser mencionadas e levadas em consideração. Na versão em questão, não há suporte para a composição de cenários multi-células, ou seja, para cenários que consideram a presença de mais de uma eNodeB. Desta forma, o uso da tecnologia LTE fica limitada pela capacidade teórica da eNodeB. Utilizando a faixa de frequência de 2,1 GHz com canais de 20 MHz de largura de banda, ficam disponíveis 100 RBs *(resource blocks)* úteis para a transferência de dados. Logo, somente 100 UEs *(user equipments)* ficam simultaneamente conectados à rede LTE, o que corresponde a 100 veículos no cenário de simulação. Uma peculiaridade dessa extensão é a área de cobertura da eNodeB que é limitada à uma região com 5 km de raio.

Outra limitação é a ausência de suporte de definições de fluxos de veículos na modelagem de tráfego realizada no SUMO. No SUMO, há a alternativa de se definir fluxos de veículos com a mesma categoria e mesma rota. O tempo de partida dos veículos integrantes do fluxo podem ser definidos como periódicos ou probabilísticos, dado um intervalo de tempo. Essa alternativa foi utilizada inicialmente para definir o fluxo de veículos na Av. Gov. Agamenon Magalhães seguindo o modelo probabilístico para o tempo de partida. Contudo, foi preciso remodelar o tráfego da via utilizando o script *randomTrips.py*, desenvolvido em Python, que é parte integrante do pacote de ferramentas do SUMO. Desta forma, foi possível gerar os arquivos com as definições individuais dos veículos com a mesma quantidade e intervalos entre partidas equivalentes ao fluxo inicialmente modelado, porém com rotas distintas e aleatórias. Foi necessário processar os arquivos gerados para substituir as rotas aleatórias pela rota predefinida no fluxo de veículos original.

Uma outra limitação foi percebida no Veins LTE 1.3. Quando ocorriam colisões entre veículos e/ou algum veículo permanecia parado por mais de 300 segundos nas simulações dos cenários V2X-LTE, o SUMO acionava o mecanismo de *teleport*. O Veins LTE não consegue lidar com a retirada de um veículo abruptamente do cenário e, esporadicamente, interrompe as simulações. Para solucionar este problema, foi necessário passar parâmetros para desativar o mecanismo de *teleport* em cada execução de uma instância do SUMO correspondente a uma simulação. No Veins LTE 1.3, é possível executar esta ação, pois a instanciação do SUMO é realizada diretamente a partir do OMNet++ por meio de um módulo complementar (HAGENAUER; DRESSLER; SOMMER, 2014). Para se obter condições equivalentes nas simulações dos cenários V2V e V2V-RSU, foi preciso replicar esta solução no Veins 4.5. Contudo, não foi possível aplicar a solução encontrada de imediato no Veins 4.5, pois a instanciação do SUMO é realizada por um *script* denominado *sumo-launchd.py* implementado em Python (SOMMER; GERMAN; DRESSLER, 2011). Esse *script* não dá suporte à passagem adicional de parâmetros para o SUMO. A solução encontrada para resolver essa dificuldade foi realizar adaptações no código do Veins 4.5, com o objetivo de integrar o módulo para instanciação do SUMO diretamente a partir do OMNet++. Desta forma, não foi mais necessário utilizar o *script sumo-launchd.py*.

Na Seção 3.4 também será demonstrado que o Veins LTE 1.3 não atende satisfatoriamente os requisitos para avaliação de métricas de rede.

3.2 Aplicações Desenvolvidas

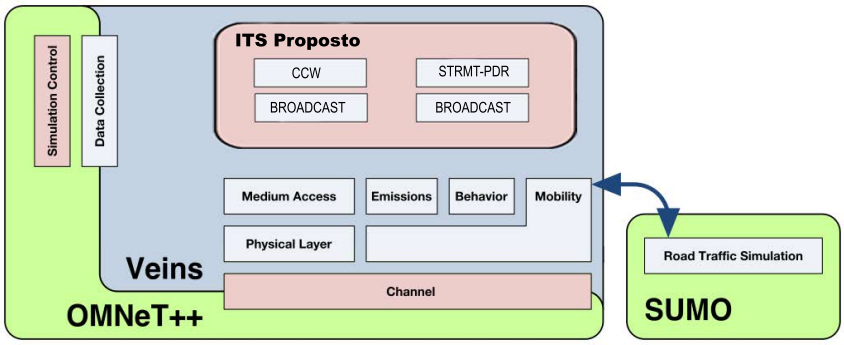
Para avaliar o impacto da implantação do ITS nos cenários especificados na Subseção 3.1.2, foram desenvolvidas duas aplicações. A primeira aplicação é a CCW *(Collaborative Collision Warning)*, que permite a veículos envolvidos em acidentes a possibilidade de enviar mensagens de alerta, por meio do padrão WAVE, aos veículos situados nas proximidades do local do acidente. Desta forma, os veículos que recebem o alerta tomam a ação mais apropriada após o recebimento da mensagem: ou diminuem a sua velocidade para evitar novos acidentes, ou mudam suas rotas para evitar o local da ocorrência e, em seguida, encaminham as mensagens de alerta para outros veículos na região.

No Veins, não há nenhuma função implementada capaz de indicar diretamente quando um acidente, agendado ou não, ocorreu. Um *flag* foi adicionado ao código da classe que controla a mobilidade no Veins, com o intuito de reproduzir a função de uma rede de sensores instalada nos veículos, capaz de identificar a ocorrência de algum acidente. Dessa forma, foi viabilizada a identificação dos acidentes planejados nas simulações em tempo de execução.

A segunda aplicação consiste em um sistema para monitoramento de tráfego em tempo real e DRP *(Dynamic Route Planning)*, que foi denominado de STRMT-PDR (Sistema em Tempo Real para Monitoramento de Tráfego com Planejamento Dinâmico de Rotas). O STRMT-PDR é capaz de detectar a formação de congestionamentos por meio do monitoramento da velocidade de cada veículo a cada 0,1 segundos. Caso a velocidade fique abaixo de um limiar (4 km/h) durante um determinado período de tempo (180 s), o veículo em questão dissemina a informação com um indicativo de congestionamento para os veículos nas suas proximidades. Nos cenários V2V e V2X-RSU, isto ocorre mediante o uso do padrão WAVE. No cenário V2X-LTE, a informação de indicativo de congestionamento é enviada pela rede LTE a um servidor de monitoramento de tráfego, que por sua vez, realiza o *broadcast* da informação para os veículos conectados a rede LTE naquele instante. Os veículos que recebem a mensagem de indicativo de congestionamento realizam uma nova avaliação da sua rota, considerando o local com o indicativo de congestionamento e, se for o caso, alteram a sua rota. Em seguida, a mensagem com o indicativo de congestionamento é disseminada através do padrão WAVE para os veículos nas proximidades. Ambas as aplicações são reativas, ou seja, somente é tomada alguma ação após o acionamento dos respectivos gatilhos. A estratégia de disseminação de informação escolhida foi o *broadcast*. As aplicações supracitadas são executadas conjuntamente, conforme o esquema da Figura 20.

Para mensurar os impactos causados pela implantação do ITS, foi necessário induzir acidentes nas principais vias da região urbana considerada. Para manter sobre controle a

Figura 20 – Esquema do funcionamento do ITS proposto no Veins.



Fonte: (Veins Website, 2017)

frequência e a localidade dos acidentes que acontecem nos cenários simulados, foi necessário desativar a ocorrência de colisões aleatórias no SUMO. A solução foi semelhante àquela descrita na Subseção 3.1.2 para o caso do *teleport*, onde foi necessário passar parâmetros adicionais a cada instanciação do SUMO.

3.3 Simulações Realizadas

Para avaliar os impactos da implantação do ITS, as simulações foram realizadas comente considerando o fluxo de veículos no sentido sul-norte da Av. Gov. Agamenon Magalhães, com aproximadamente 3500 veículos. As inserções dos veículos nos cenários foram distribuídas nos primeiros 3600 segundos simulados. Os parâmetros configurados para as simulações estão na Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros configurados para as simulações.

Parâmetro	**Valores**
Tamanho do pacote (802.11p)	48 bytes
Tamanho do pacote (LTE)	18 bytes
Taxa de transmissão (802.11p)	6 Mbps
Potência de transmissão das OBUs e RSUs (802.11p)	20 mW
Potência de transmissão da eNodeB	45 mW
Potência de transmissão da OBU (LTE)	26 mW
CCA threshold (802.11p)	-65 dBm
Ruído térmico (802.11p)	-110 dBm
Ruído térmico (LTE)	-104,5 dBm
Sensibilidade da camada física (802.11p)	-89 dBm
Limite de duração para as simulações	10000 s

Fonte: o autor (2017).

Foi induzido um acidente aos 200 segundos simulados no cruzamento entre a Av. Gov.

Agamenon Magalhães e a Av. Gov. Carlos de Lima Cavalcanti nas proximidades da Praça do Derby. Quatro veículos foram envolvidos no acidente ocasionando o bloqueio total da via principal no sentido sul-norte da Av. Gov. Agamenon Magalhães.

As simulações foram realizadas em um computador com as seguintes especificações: sistema operacional Kubuntu 16.04 64 bits, processador Intel Core i7-4790 @ 3,6 GHz com oito núcleos e 32 GB de memória RAM. Com o intuito de assegurar a confiabilidade estatística dos resultados, um conjunto com 33 sementes para números aleatórios foi utilizado. Uma semente distinta foi utilizada para cada repetição das simulações em cada cenário. A média de duração das simulações para cada cenário e a quantidade de repetições considerada para compor os resultados estão representadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Duração das simulações para o conjunto de simulações com 3500 veículos e a quantidade de repetições considerada para cada cenário.

Cenário	**Duração**	**Número de Repetições**
Sem acidente	40 min	25
Com acidente	1 hora	25
V2V	4 horas	25
V2X-RSU	5 horas	25
V2X-LTE	6 dias	5

Fonte: o autor (2017).

O número de repetições considerada para cada cenário foi adotado devido às peculiaridades observadas para algumas repetições com um impacto significativo na média do tempo total de trajeto. A demonstração dessas peculiaridades está exposta no final da seção 3.4.

3.4 Resultados

O principal objetivo do ITS proposto é mitigar os impactos causados por acidentes e congestionamentos na RMR. Dito isto, na Tabela 7 está representada para o tempo total de trajeto, a média amostral, o desvio padrão amostral, os valores mínimo e máximo e os limites inferiores e superiores do intervalo de confiança para a média com α= 0,05.

Sem a influência do ITS proposto houve um aumento de aproximadamente 60% na média tempo de trajeto entre os cenários sem e com acidente. Já sob a influência do ITS proposto, houve um redução de cerca de 48,7% no tempo desperdiçado devido ao congestionamento ocasionado pelo acidente induzido, considerando os cenários V2V e V2X-RSU, já para o cenário V2X-LTE foi obtido uma redução de 19,3%.

Na Figura 21 está representada a média do tempo de trajeto desperdiçado no congestionamento ocasionado pelo acidente induzido para cada cenário. Para efeitos práticos, os

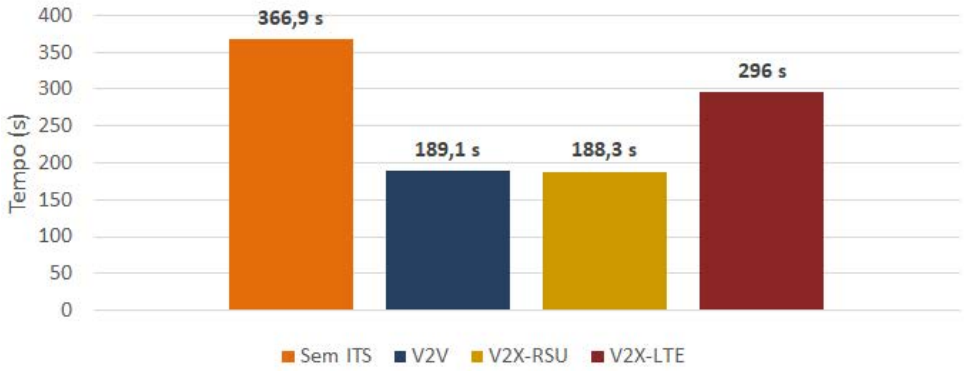
Tabela 7 – Tempo de trajeto para todos os cenários simulados com média amostral, desvio padrão amostral, valores mínimo e máximo da amostra e intervalo de confiança (α= 0,05) para a média amostral.

Cenário	$\overline{x}$	s	Mín.	Máx.	$IC_{inf.}$	$IC_{sup.}$
Normal	603,8 s	20,1	500,2 s	659,7 s	603,1 s	604,5 s
Acidente	970,7 s	177,1	500,1 s	1499,0 s	964,8 s	976,5 s
V2V	792,9 s	337,7	559,7 s	2530,5 s	781,7 s	804,1 s
V2X-RSU	792,1 s	329,8	560,1 s	2488,0 s	781,1 s	803,0 s
V2X-LTE	899,8 s	336,9	487,4 s	2653,6 s	888,7 s	910,9 s

Fonte: o autor (2017).

cenários V2V e V2X-RSU se mostraram equivalentes, sem diferenças significativas entre os resultados avaliados.

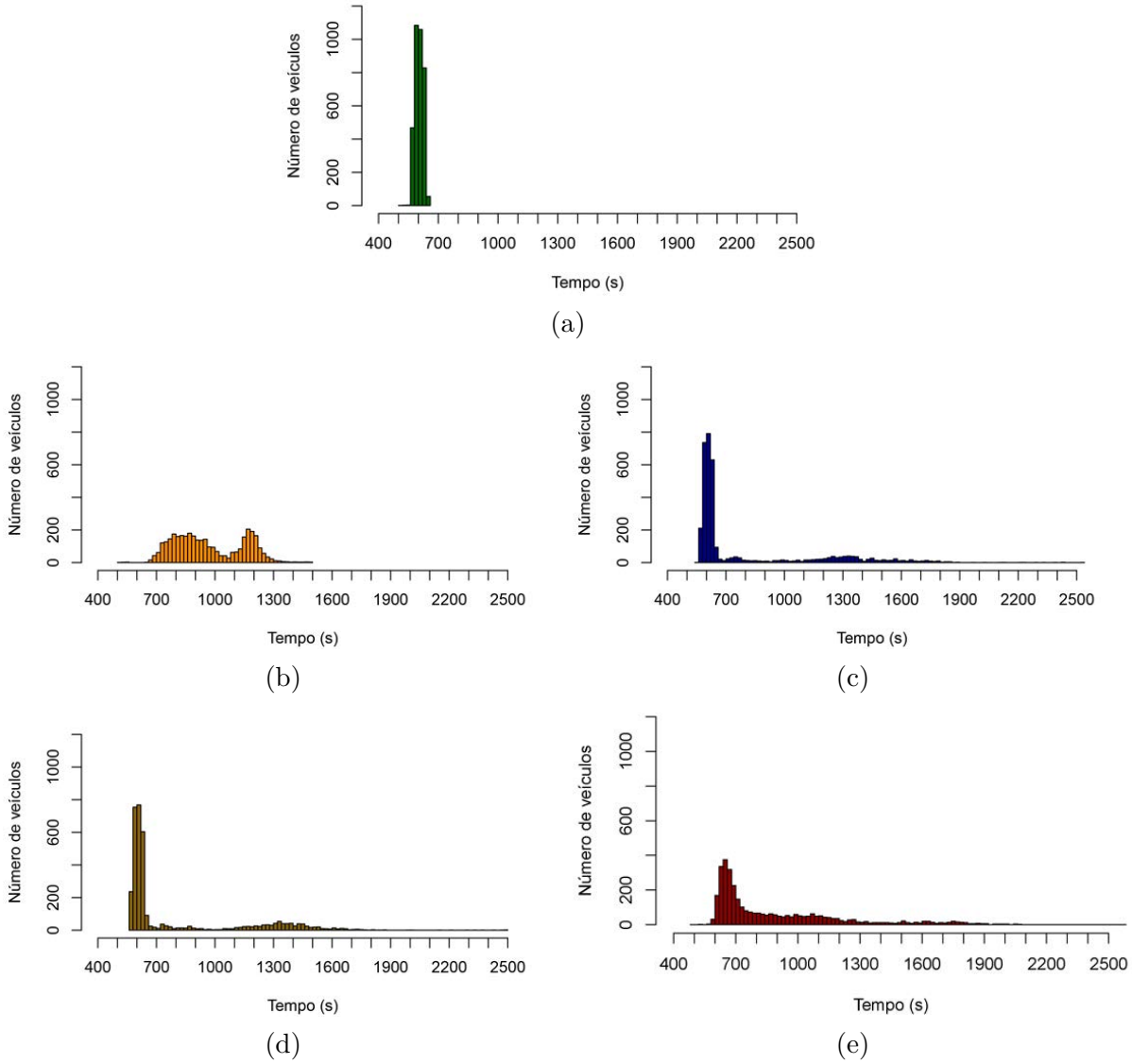
Figura 21 – Média do tempo de trajeto desperdiçado no congestionamento ocasionado pelo acidente induzido para os cenários simulados.



Fonte: o autor (2017).

Na Figura 22 estão os histogramas do tempo de trajeto para cada cenário, onde nota-se a concentração de um maior número de veículos próximo a média. Nos cenários sob influência do ITS proposto, percebe-se uma maior dispersão no tempo de trajeto para alguns veículos entre os 700 e 2200 segundos simulados. Tal fato ocorre devido à localização dos veículos e às rotas disponíveis para os seus respectivos destinos no momento em que receberam a informação da ocorrência de acidente ou indicativo de congestionamento.

Figura 22 – Histogramas para o tempo de trajeto nos cenários simulados: (a) sem acidente, (b) com acidente, (c) V2V, (d) V2X-RSU e (e) V2X-LTE.



Fonte: o autor (2017).

Na Tabela 8 está representada para a distância percorrida a média amostral, o desvio padrão amostral, os valores mínimos e máximos e os limites inferiores e superiores para a média com α= 0,05. Houve um aumento de menos de 5% na distância percorrida para os cenários V2V e V2X-RSU, enquanto para o cenário V2X-LTE houve um aumento de aproximadamente 8,8%. Dessa forma, fica demonstrado que o impacto na distância percorrida, em média, é tolerável frente ao ganho obtido no tempo de trajeto.

Na Figura 23, percebe-se graficamente a equivalência na diferença da distância média percorrida para os cenários V2V e V2X-RSU, enquanto no cenário V2X-LTE foi constatada a maior diferença para a distância média percorrida entre os cenários considerados.

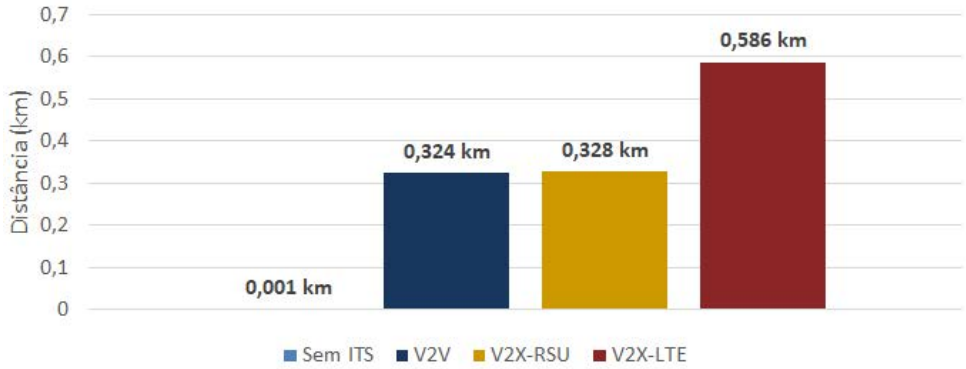
Percebe-se, a partir dos histogramas na Figura 24 para a distância percorrida, que para o cenário V2X-LTE houve uma dispersão maior dos veículos por diferentes rotas,

Tabela 8 – Distância percorrida para todos os cenários simulados com média amostral, desvio padrão amostral, valores mínimo e máximo da amostra e intervalo de confiança (α= 0,05) para a média amostral.

Cenário	$\overline{x}$	s	Mín.	Máx.	$IC_{inf.}$	$IC_{sup.}$
Normal	6,667 km	0,021 km	6,657 km	6,674 km	6,6672 km	6,6674 km
Acidente	6,668 km	0,019 km	6,660 km	6,675 km	6,6679 km	6,6681 km
V2V	6,991 km	0,544 km	6,659 km	8,428 km	6,6973 km	7,0092 km
V2X-RSU	6,995 km	0,544 km	6,658 km	8,427 km	6,9676 km	7,0127 km
V2X-LTE	7,253 km	0,619 km	6,663 km	9,950 km	7,1679 km	7,2084 km

Fonte: o autor (2017).

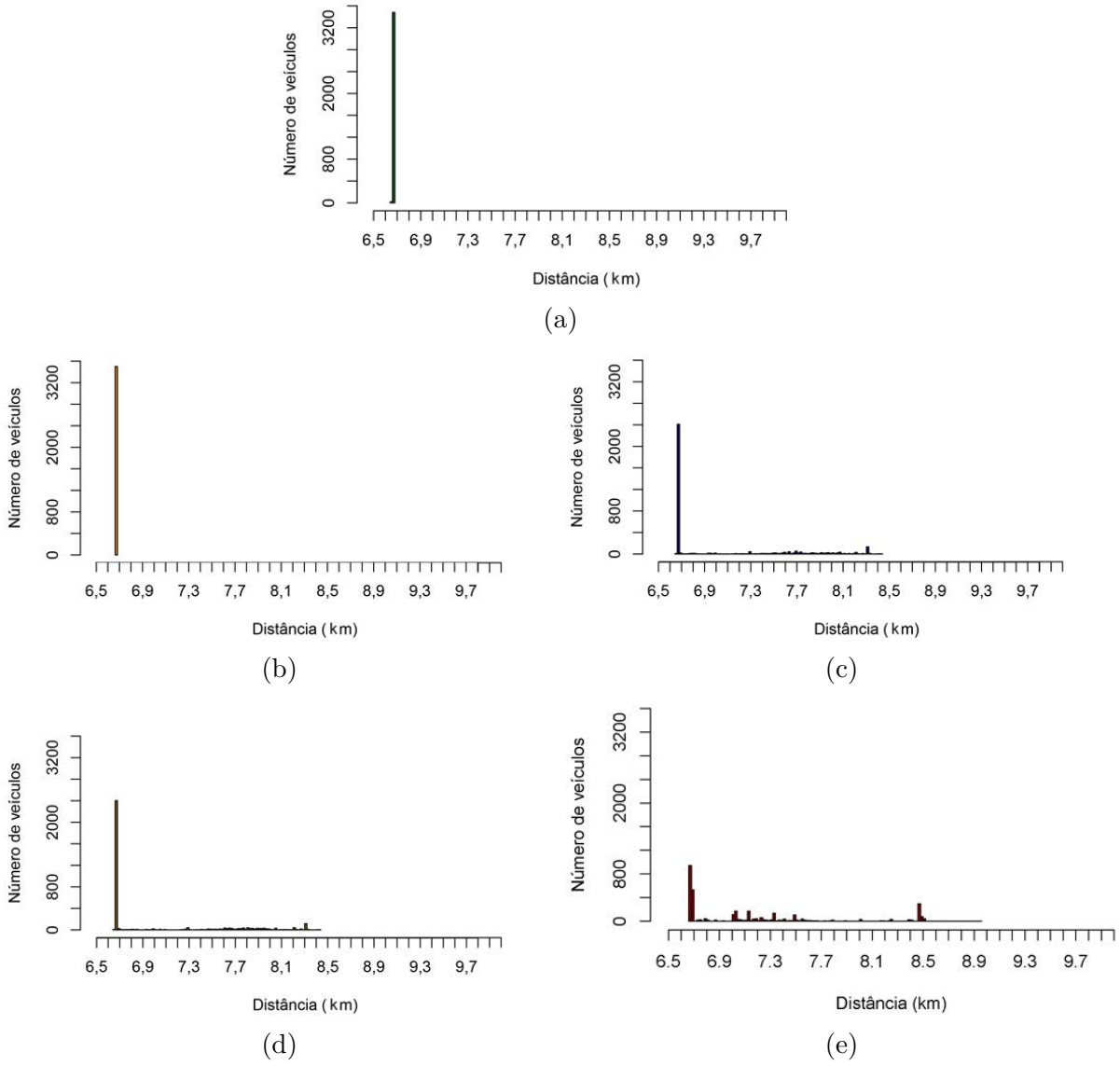
Figura 23 – Diferença da distância média percorrida para os cenários simulados.



Fonte: o autor (2017).

contribuindo, dessa forma, para o aumento da média da distância percorrida nesse cenário. Tal fato pode ser explicado pela disseminação da informação com indicativo de congestionamento ou alerta de acidente de forma mais ampla, ou seja, no momento do recebimento da informação os veículos estavam em localizações distantes uns dos outros contribuindo para a criação de um conjunto de rotas mais diversificado.

Figura 24 – Histogramas para a distância percorrida nos cenários: (a) sem acidentes, (b) com acidentes, (c) V2V, (d) V2X-RSU e (e) V2X-LTE.

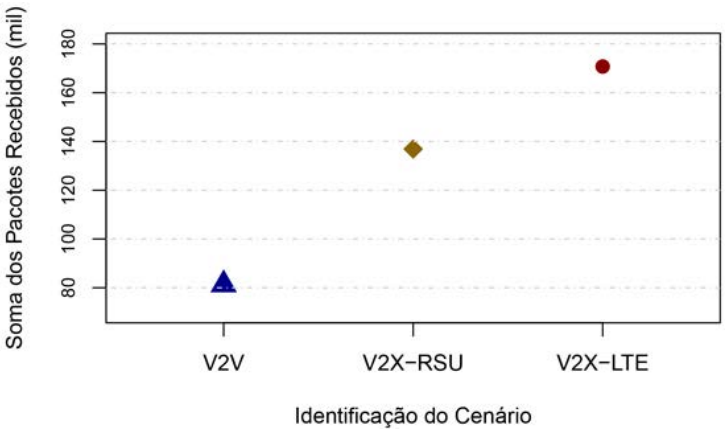


Fonte: o autor (2017).

Para mensurar a disseminação da informação foi montado o gráfico da quantidade total de pacotes recebidos por cenário. Na Figura 25, nota-se que no cenário V2X-LTE foi recebida uma maior quantidade de pacotes, cerca de 170 mil pacotes, indicando que a informação de indicativo de congestionamento ou de alerta de acidente foi recebida por mais veículos. Logo em seguida está o cenário V2X-RSU com cerca de 140 mil pacotes recebidos e o cenário V2V com cerca de 80 mil pacotes recebidos.

A média do PDR, métrica que avalia a taxa de sucesso no recebimento de pacotes, para cada cenário está representada na Figura 26 com o intervalo de confiança com α= 0,05. Nota-se a tendência de um melhor desempenho para o PDR nos cenários com uma maior área de cobertura, ou seja, no cenário V2X-LTE seguido do cenário V2X-RSU. Pode-se atribuir essa tendência ao fato dos veículos estarem mais distantes uns dos outro no mo-

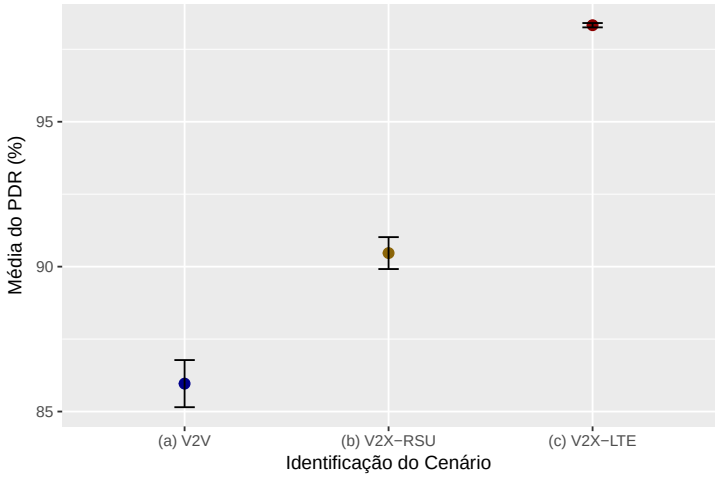
Figura 25 – Total de pacotes recebidos para os cenários simulados.



Fonte: o autor(2017).

mento do recebimento do pacote, desta forma o efeito da interferência entre transmissões simultâneas de veículos próximos é mitigado.

Figura 26 – Média do PDR para os cenários simulados com o intervalo de confiança para a média com α= 0,05.



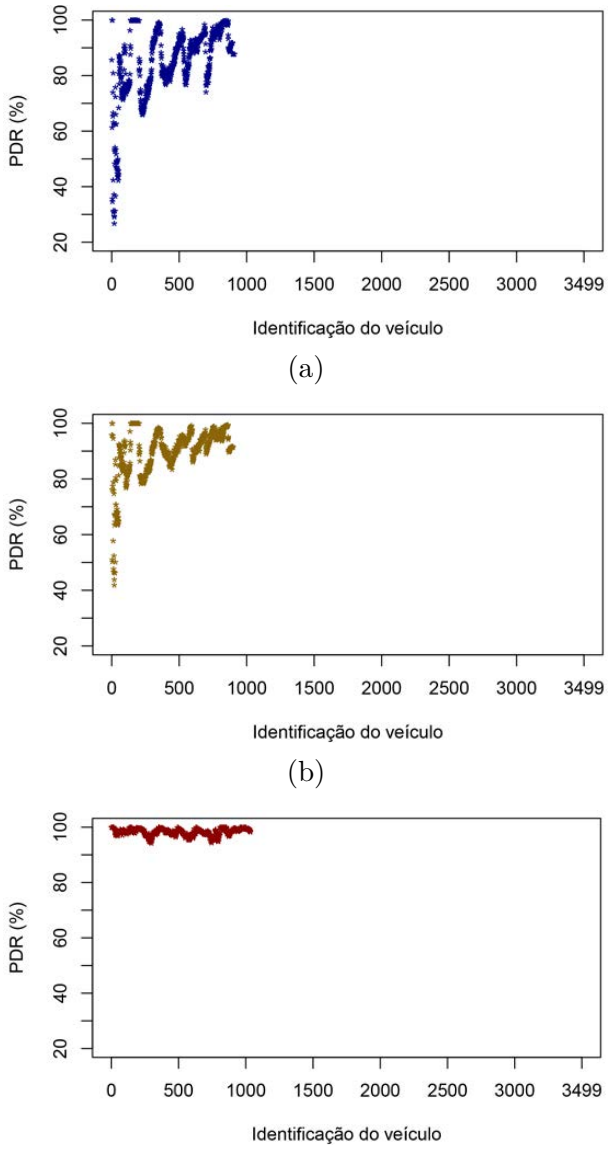
Fonte: o autor(2017).

Nas Figuras 27, 30 e 32, no eixo das abscissas, os veículos foram ordenados por tempo de partida nas simulações e um número de identificação de 0 a 3499 foi atribuído para cada veículo. Percebe-se nos gráficos das figuras supracitadas que o ITS proposto teve influência, em via de regra, nos primeiros 1000 veículos, o que condiz com o início do acidente induzido aos 200 segundos simulados mais a sua duração de 900 segundos.

Nas Figuras 27a e 27b, respectivamente para os cenários V2V e V2X-RSU, os primeiros veículos, os quais estavam mais próximos do acidente ocorrido aos 200 segundos simulados, apresentaram o pior PDR. No gráfico para o cenário V2V (Figura 27a) nota-se que os primeiros veículos obtiveram o PDR abaixo dos 40%, enquanto que no gráfico para o cenário V2X-RSU (Figura 27b) percebe-se que os mesmos veículos obtiveram um PDR

acima de 40%. A explicação para tal fato é que o encaminhamento dos pacotes realizado pela RSU, estrategicamente posicionada, foi eficaz. Desta forma, a aproximação ao local do acidente por mais veículos foi evitada, diminuindo, assim, a densidade de veículos no local que por consequência contribuiu para mitigar os efeitos da interferência causada por transmissões simultâneas entre veículos na recepção de mensagens. Tal fato é visualizado de maneira mais clara nos histogramas para o PDR na Figura 28. Para o cenário V2X-LTE (Figuras 27c e 28c), o PDR, estranhamente, está próximo aos 100% para todos os veículos que sofreram influência do ITS. Tal fato será explicado juntamente à análise da latência.

Figura 27 – PDR para os veículos ordenados por tempo de entrada na simulação nos cenários: (a) V2V, (b) V2X-RSU e (c) V2X-LTE.



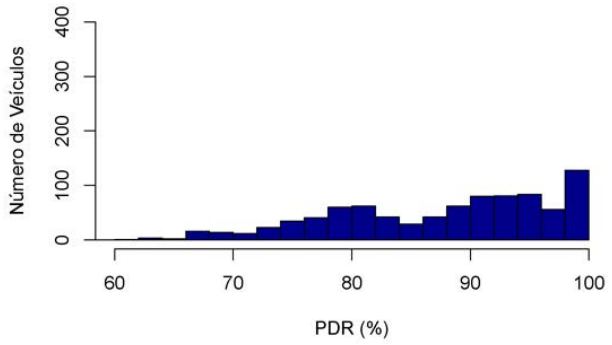
(a)

(b)

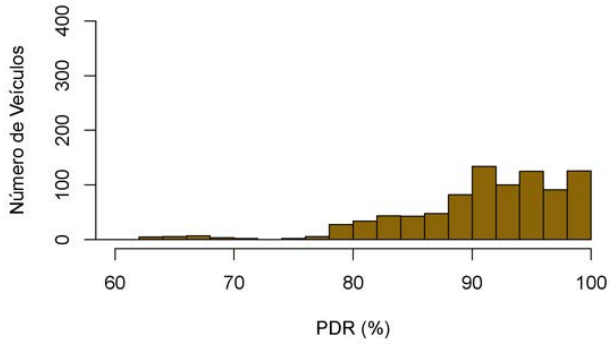
(c)

Fonte: o autor (2017).

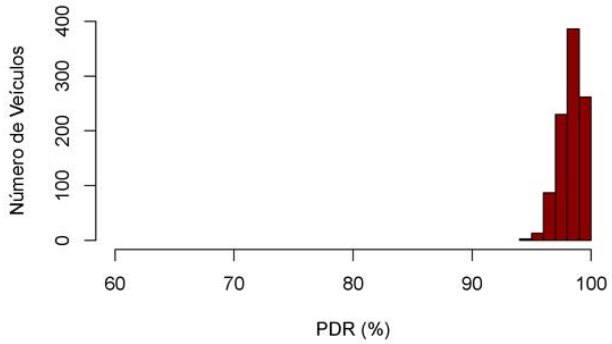
Figura 28 – Histogramas para o PDR nos cenários: (a) V2V, (b) V2X-RSU e (c) V2X-LTE.



(a)



(b)

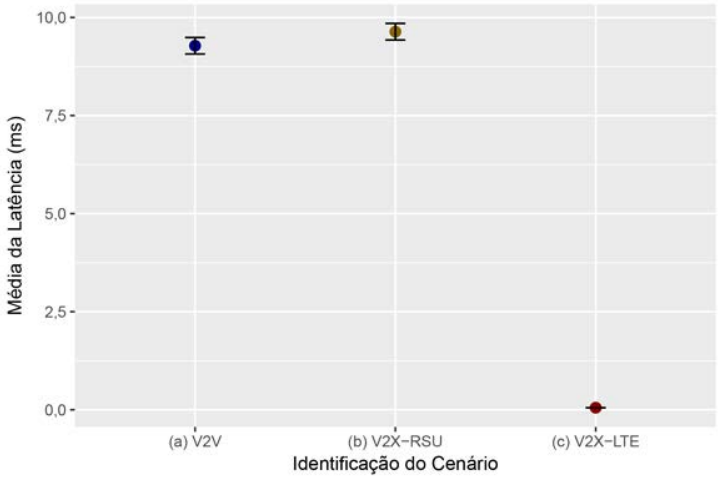


(c)

Fonte: o autor (2017).

No documento técnico *"DSRC Implementation Guide: A guide to users of SAE J2735 message sets over DSRC"* (KELLEY; CHRISS; SUMNER, 2010) constam os requisitos de latência necessários para os tipos de mensagens utilizadas no padrão WAVE. Para as aplicações que compõe o ITS proposto, quais sejam, CCW e STRMT-PDR, a latência de recepção tolerada para ambas é de menos de 10 milissegundos. Desta forma, a análise da latência nos cenários simuladores foi realizada. Na Figura 29, está a média da latência obtida para cada cenário com o intervalo de confiança com α= 0,05. Verifica-se que, em média, a latência medida ficou dentro dos critérios estabelecidos pela literatura.

Figura 29 – Média da latência para os cenários simulados com o intervalo de confiança para a média com α= 0,05.

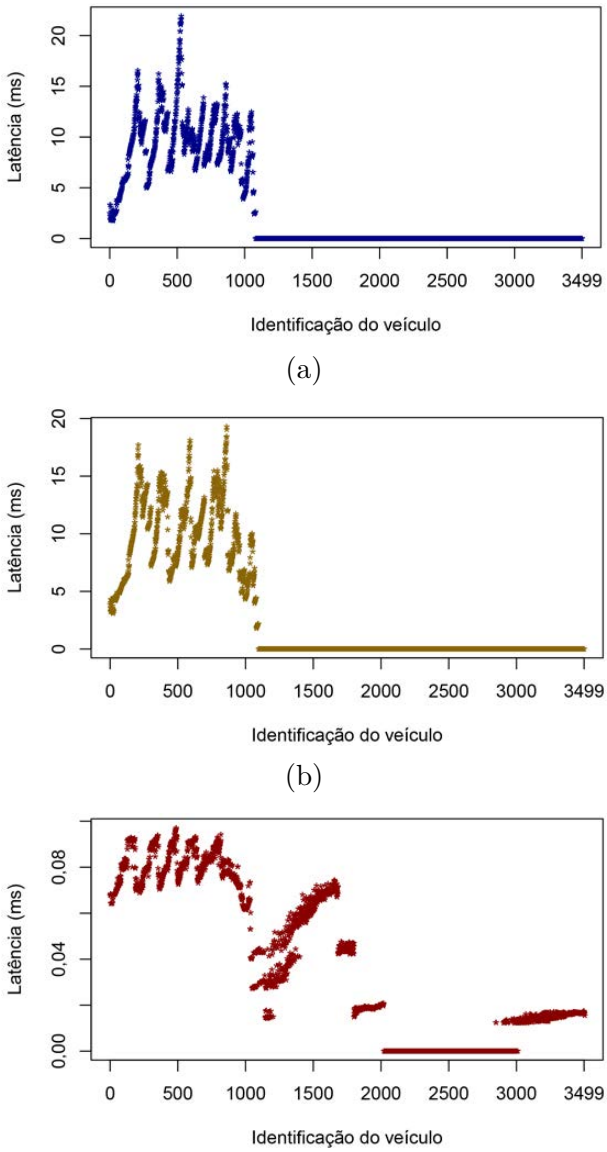


Fonte: o autor (2017).

Na Figura 30 estão representados os gráficos da latência média para cada veículo nos cenários simulados. Para os 1000 primeiros veículos nos gráficos das Figuras 30a e 30b, respectivamente, nos cenários V2V e V2X-RSU, observa-se um padrão de picos semelhante ao obtido nos gráficos para o PDR nas Figuras 27a e 27b. Esse padrão indica a aproximação de grupos de veículos ao local do acidente. O quanto mais rápido a informação sobre o acidente é recebida, outra rota é tomada pelos veículos e dessa forma evita-se que grandes quantidades de veículos formem um congestionamento e a consequente degradação na recepção de mensagens devido à interferência.

No gráfico da Figura 30c, para o cenário V2X-LTE, verifica-se uma latência extremamente baixa, contrastando com os dados obtidos para os cenários V2V e V2X-RSU. No gráfico para o PDR (Figura 27c), já foi notado o comportamento incomum nas simulações do cenário V2X-LTE. Dito isto, pode-se inferir que o Veins LTE 1.3 não atende satisfatoriamente aos requisitos necessários para analisar as métricas de latência e PDR, para o padrão WAVE, em simulações realísticas de VANETs. A latência observada no gráfico da Figura 30c é basicamente devido à latência inserida pela camada física e pela subcamada MAC do padrão WAVE, representadas na Figura 11. Desta forma, os resultados obtidos para as métricas de latência fim-a-fim e PDR não devem ser considerados no cenário V2X-LTE.

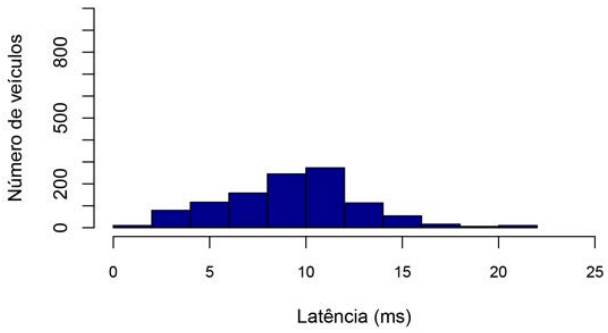
Figura 30 – Latência média para os veículos ordenados por tempo de entrada na simulação nos cenários: (a) V2V, (b) V2X-RSU e (c) V2X-LTE.



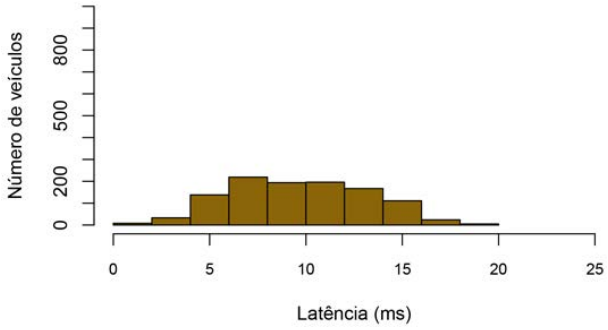
Fonte: o autor (2017).

Na Figura 31 estão representados os histogramas da latência média para cada cenário. Na Figura 31a, nota-se uma concentração maior de veículos com latência média abaixo dos 10 ms em comparação à Figura 31b, respectivamente para os cenários V2V e V2X-RSU. Tal fato ocorre devido à área de abrangência maior proporcionada pela RSUs posicionadas estrategicamente, dessa forma a transmissão dos pacotes é realizada através de uma distância maior, tendo um pequeno reflexo na latência fim-a-fim.

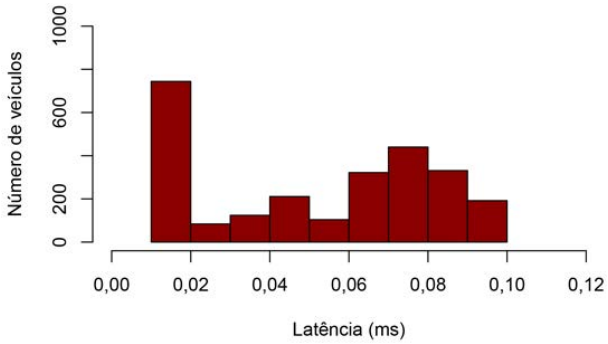
Figura 31 – Histogramas para a latência média nos cenários: (a) V2V, (b) V2X-RSU e (c) V2X-LTE.



(a)



(b)



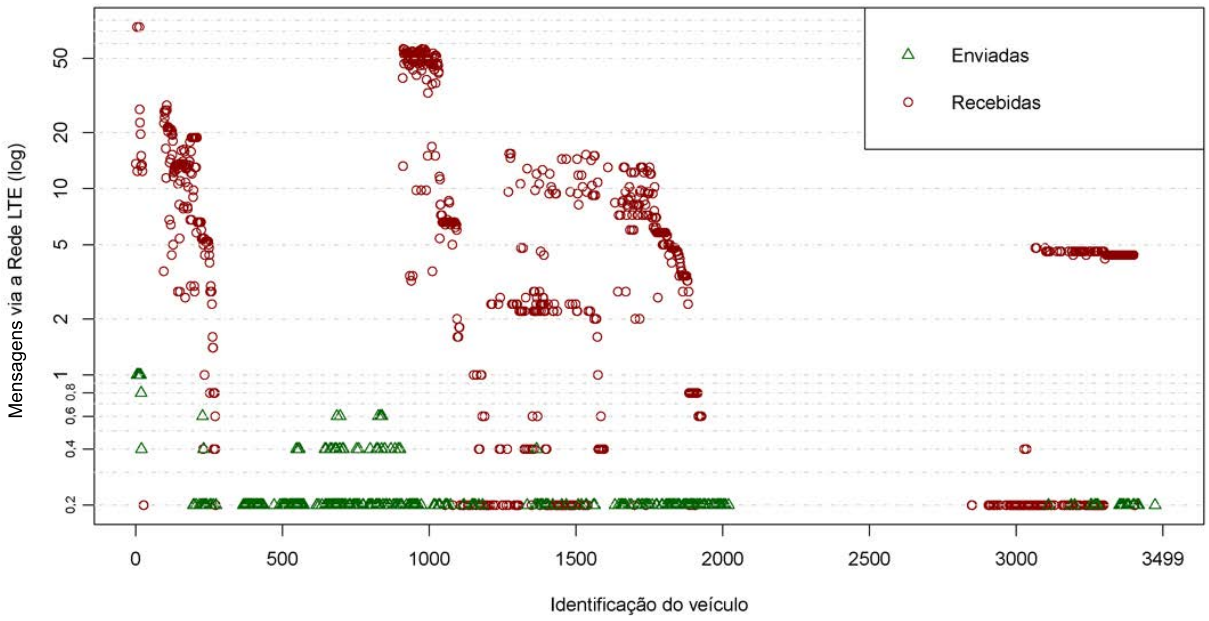
(c)

Fonte: o autor (2017).

Adicionalmente, as quantidades de mensagens recebidas e enviadas através da rede LTE estão representadas por veículo no gráfico da Figura 32, onde o eixo das ordenadas está em escala logarítmica. Tendo em vista que foram consideradas cinco repetições para o cenário V2X-LTE e as métricas avaliadas, para cada veículo, foram calculadas através da média dos resultados das repetições, nota-se que somente em um único momento são enviadas mensagens referentes ao acidente induzido aos 200 segundos simulados. Os triângulos em verde na linha do valor 1, no eixo das ordenadas, representam as referidas mensagens enviadas devido ao acidente induzido. Nas linhas dos valores 0,2, 0,4, 0,6 e 0,8 constam indicativos de mensagens enviadas por outros veículos respectivamente em uma, duas, três e quatro repetições. Por consequência, mensagens são recebidas via a rede LTE

pelos veículos com identificação entre os números 1000 e 2000 e entre os números 3000 e 3500. Tal fato também pode ser constatado no gráfico para a latência média, na utilização do padrão WAVE, na Figura 30c.

Figura 32 – Quantidade de mensagens enviadas e recebidas por veículo através da rede LTE. O eixo das ordenadas está em escala logarítmica. Os veículos estão ordenados por tempo de entrada na simulação e identificados no eixo das abscissas pelos números de 0 a 3499.



Fonte: o autor (2017).

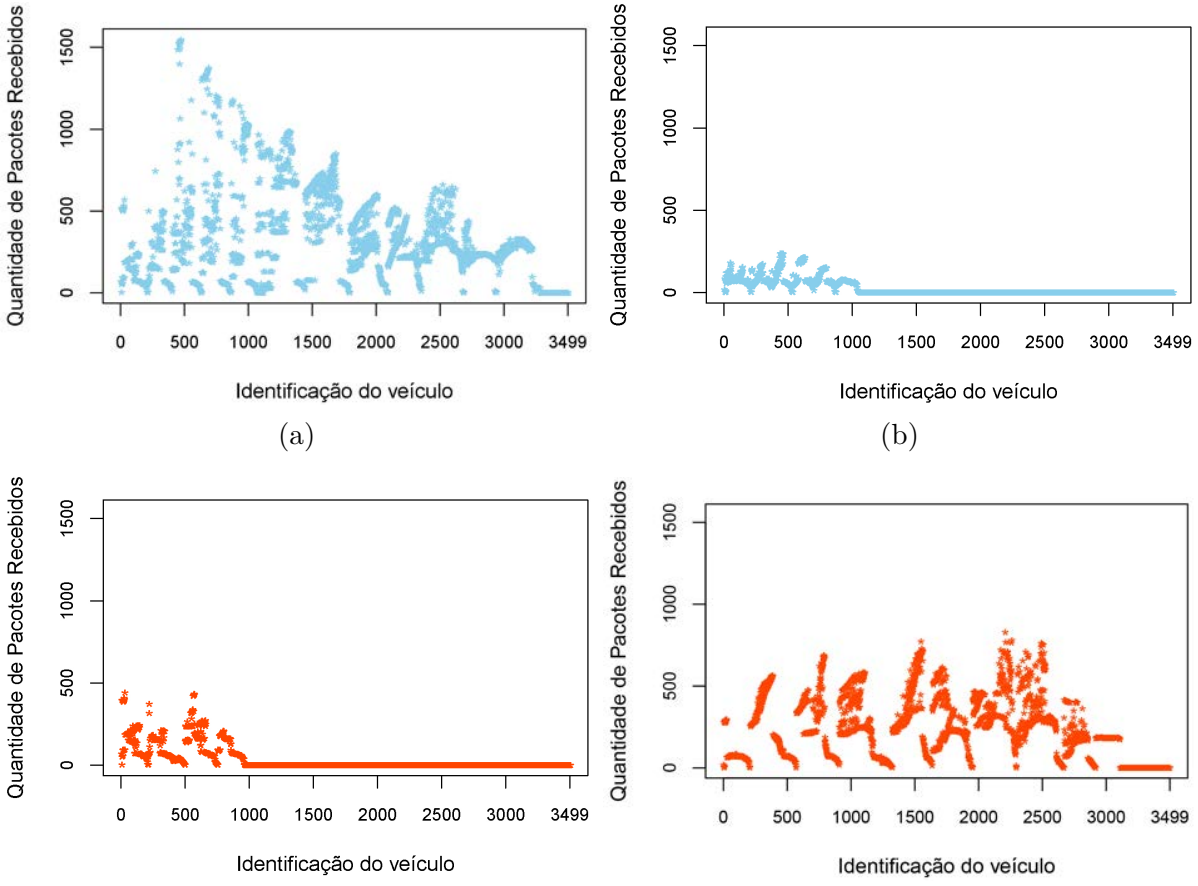
As mensagens enviadas através da rede LTE, representadas na Figura 32, excluindo aquelas devido ao acidente induzido, foram em consequência de congestionamentos formados após o acidente ter sido resolvido. As possibilidades constatadas para tal acontecimento são duas. A primeira é devido às rotas tomadas pelos veículos através de vias que não foram suficientemente ajustadas na modelagem do cenário de mobilidade, desta forma causando afunilamentos em alguns pontos e, por consequência, as retenções são formadas. A segunda possibilidade é devido à influência da utilização de diferentes sementes, utilizadas na geração de números aleatórios em cada repetição, sobre o nível de destreza e o grau de impaciência dos condutores. Conforme mencionado no final da subseção 3.1.1, é possível parametrizar o nível de destreza e o grau de impaciência para cada condutor no SUMO. Na Figura 17 está evidenciada uma grande retenção causada simplesmente pela falta de oportunidade dos condutores na via principal passarem para a via local devido ao intenso fluxo de veículos e pelo respeito à distância necessária para a troca de faixa sem expor outros condutores a risco de colisão. Na tentativa de transpor os fatos supracitados, o valor base da impaciência foi alterado para 0,7 e algumas simulações foram executadas.

Na Figura 33 estão representados os gráficos para a quantidade de pacotes recebidos nas simulações complementares realizadas. No eixo das abscissas os veículos estão ordenados pelo tempo de entrada na simulação e identificados com números de 0 a 3499. Na

Figura 33a está representado o gráfico para uma repetição do cenário V2X-RSU onde foi identificado a ocorrência de congestionamento devido à espera excessiva dos condutores pela preferência de alguma via. A média do tempo de trajeto para esta simulação foi de 2223,8 segundos. Já na Figura 33b está o gráfico da simulação para o cenário V2V. Para essa simulação foi utilizada a mesma semente de números aleatórios e a média do tempo de trajeto foi de 826,3 segundos. Nota-se que na simulação do cenário V2X-RSU vários congestionamentos ocorreram afetando negativamente o tempo de trajeto de todos os veículos, em contraste ao que ocorreu na simulação do cenário V2V, onde o ITS proposto atuou e mitigou os transtornos causados pelo acidente induzido. As situações supracitadas podem ser constatadas, respectivamente, nas Figuras 33a e 33b. Após a alteração do valor do grau de impaciência na simulação do cenário V2X-RSU, utilizando a mesma semente, verificou-se uma melhora significativa nas métricas analisadas para a simulação do cenário V2X-RSU. A média do tempo de trajeto foi reduzida para 767,8 segundos, uma redução de 65,4%, e a quantidade de pacotes recebidos caiu significativamente, conforme se observa no gráfico da Figura 33c. Já para a simulação do cenário V2V houve um piora significativa dos resultados devido a formação de novos congestionamentos. A média do tempo de trajeto subiu para 1998,1 segundos, um aumento de 142%, e a quantidade de pacotes recebidos por veículo aumentou drasticamente, conforme se observa na Figura 33d.

Logo, tendo como base os fatos averiguados, a influência do grau de impaciência dos condutores e a causalidade influenciada por diferentes sementes utilizadas na geração de números aleatórios têm um impacto relevante nos resultados das simulações. Desta forma, estudos complementares são necessários para analisar esses fatores em mais detalhes. Por conta disso, as repetições para os cenários V2V e V2X-RSU, onde estas situações foram observadas, não foram consideradas na composição dos resultados. Já para o cenário V2X-LTE, todas as repetições realizadas foram consideradas, o que justifica, em parte, o desempenho inferior do ITS proposto no cenário em questão.

Figura 33 – Gráficos da quantidade de pacotes recebidos nas simulações complementares com diferentes níveis de impaciência para os cenários V2V e V2X-RSU. (a) e (c) são referentes ao cenário V2X-RSU, respectivamente, com níveis de impaciência 0 e 0,7. (b) e (d) são referentes ao cenário V2V, respectivamente, com níveis de impaciência 0 e 0,7.



Fonte: o autor (2017).

4 CONCLUSÃO

O uso de tecnologia no auxílio à mobilidade urbana é uma tendência mundial. Estudos sobre o tema tem grande relevância, posto o potencial em trazer benefícios à sociedade em geral. Nesta dissertação foi realizada uma análise da implantação de um ITS na região central da cidade do Recife, contemplando uma das principais vias da RMR pertencentes ao corredor de mobilidade Norte-Sul. O foco da análise foi a avaliação de diferentes tecnologias de comunicação para VANETs na implantação do ITS e seus respectivos impactos na mobilidade urbana. Foi demonstrado que o ITS proposto, com o auxílio de VANETs e com as aplicações desenvolvidas, foi capaz de reduzir em até 48,7% o tempo médio de trajeto desperdiçado nos congestionamentos ocasionados pelos acidentes induzidos, enquanto a distância média percorrida sofreu um acréscimo de no máximo 8,8%. Dito isto, os benefícios proporcionados pela implantação do ITS, na região selecionada para o estudo, foram corroborados. Entre as arquiteturas de comunicação para VANETs avaliadas a que se mostrou mais promissora foi a do cenário V2X-RSU, apesar de obter um desempenho semelhante à do cenário V2V, no que tange a métrica do tempo médio de trajeto, as métricas de latência fim-a-fim e PDR tiveram um desempenho melhor. Já para a arquitetura de comunicação do cenário V2X-LTE, não foi possível avaliar de maneira confiável o seu desempenho devido às limitações constatadas da ferramenta Veins LTE 1.3 durante o processo de elaboração da dissertação. Além disso, considerando as limitações e peculiaridades do ferramental adotado nessa análise, os aspectos técnicos avaliados para VANETs foram cumpridos, estando os resultados dentro dos requisitos sugeridos na literatura. Vale ressaltar as modificações realizadas na implementação do Veins 4.5, afim de atender às necessidades específicas do estudo desenvolvido nesta dissertação.

4.1 Trabalhos Futuros

O estudo de VANETs é relativamente recente. Dessa forma várias linhas de pesquisas ainda necessitam de avanços. Pode ser cogitado como trabalho futuro, o aperfeiçoamento do ITS proposto, afim de adequá-lo às situações específicas observadas no cenário urbano da RMR. Outra contribuição seria o desenvolvimento de novas aplicações para o cenário modelado, por exemplo, a gestão de cruzamentos sem semáforos de forma autônoma e eficiente. A modelagem mais detalhada da rede de vias urbanas, dando continuação à já realizada, também pode ser relacionado como trabalho futuro. Desta forma, seria possível abranger características adicionais, como por exemplo, linhas e paradas para o transporte público e a inserção de pedestres e ciclistas complementando, assim, o cenário de mobilidade. Também pode ser cogitado como um possível trabalho futuro o estudo, aprofundado e detalhado, sobre o impacto das características dos condutores sobre a mobilidade, como

por exemplo, características relacionadas ao grau de destreza e ao nível de impaciência. Levando em consideração todas as dificuldades enfrentadas com a ferramenta de simulação Veins LTE 1.3, pode-se futuramente contribuir com o aperfeiçoamento da ferramenta, implementado o suporte a cenários multicélulas e o suporte a fluxos de veículos modelados no SUMO.

4.2 Considerações Finais

No decorrer do desenvolvimento desse estudo várias situações foram vivenciadas e superadas, considerando a complexidade em lidar com simulações realísticas em grande escala. A primeira situação foi o grande esforço necessário para modelar a mobilidade de cenários reais, onde a resolução de um problema acarretou o surgimento de tantos outros. A segunda, foi trabalhar com várias ferramentas de simulação, onde cada uma delas tem suas peculiaridades e que devem ser consideradas em um contexto mais amplo para equiparar os resultados obtidos. Como por exemplo, a utilização do Veins 4.5 e do Veins LTE 1.3 que, por diversas vezes, incompatibilidades foram descobertas. Dentre tais incompatibilidades, se pode citar a mais simples, qual seja, a utilização de diferentes versões do SUMO, o que limitou a capacidade de extrair dados mais próximos da realidade, a exemplo do que ocorreu na modelagem para o tempo de partida de cada veículo de forma probabilística. A terceira situação superada foi a grande capacidade computacional exigida para executar simulações em grande escala. Algumas simulações foram realizadas em computadores com especificações inferiores às descritas na Seção 3.3, onde uma repetição para o cenário V2X-LTE com 3500 veículos durou 24 dias e simulações com 17500 veículos foram interrompidas pelo sistema operacional após 25 dias do início devido ao completo esgotamento dos recursos computacionais disponíveis. Ainda se pode citar o desafio em se trabalhar com grandes massas de dados. Por exemplo, os resultados obtidos nas simulações para 3500 veículos, no cenário V2X-LTE, geraram arquivos em formato de texto que se somados, para as cinco repetições, passam de 200 MB. Se caso fosse necessário obter os dados em tempo de execução nas simulações, a captura desses pode gerar arquivos de texto que ultrapassariam 5 GB para cada repetição.

Por fim, as contribuições dadas por esta dissertação podem auxiliar pesquisadores em estudos de VANETs em cenários realísticos e em larga escala. Pode-se destacar dentre as principais contribuições, o desenvolvimento de aplicações para o ITS proposto e a avaliação dessas em cenários realísticos, a documentação das etapas necessárias para a realização das simulações, as modificações e adaptações no ferramental utilizado e a comparação entre diferentes arquiteturas de comunicação para VANETs.

REFERÊNCIAS

ABBOUD, K.; OMAR, H. A.; ZHUANG, W. Interworking of dsrc and cellular network technologies for v2x communications: A survey. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 65, n. 12, p. 9457–9470, Dec 2016. ISSN 0018-9545.

ANTP. 2012. URL:http://www.antp.org.br/.

ARANITI, G.; CAMPOLO, C.; CONDOLUCI, M.; IERA, A.; MOLINARO, A. Lte for vehicular networking: a survey. *IEEE Communications Magazine*, v. 51, n. 5, p. 148–157, May 2013. ISSN 0163-6804.

ARELLANO, W.; MAHGOUB, I.; ILYAS, M. Veins extensions to implement a message based algorithm for dynamic traffic assignment in vanets simulations. In: *2014 11th Annual High Capacity Optical Networks and Emerging/Enabling Technologies (Photonics for Energy)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 29–35. ISSN 1949-4092.

BHOI, S. K.; KHILAR, P. M. Vehicular communication: a survey. *IET Networks*, v. 3, n. 3, p. 204–217, September 2014. ISSN 2047-4954.

CAMPBELL, R.; ALEXIADIS, V.; KRECHMER, D. *Connected Vehicle Impacts on Transportation Planning: Analysis of the Need for New and Enhanced Analysis Tools, Techniques, and Data—Briefing for Traffic Simulation Models*. ITS Joint Program Office-HOIT, 1200 New Jersey Avenue, SE Washington, DC 20590, 2016. 33 p. Disponível em: <https://ntl.bts.gov>.

DIAS, J. C.; ABREU, P. H.; SILVA, D. C.; FERNADES, G.; MACHADO, P.; LEITAO, A. Preparing data for urban traffic simulation using sumo. In: *1st SUMO User Conference*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 25.

DUGAEV, D.; ZINOV, S.; SIEMENS, E.; SHUVALOV, V. A survey and performance evaluation of ad-hoc multi-hop routing protocols for static outdoor networks. In: *2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–11.

Emprel. 2015. URL: http://dados.recife.pe.gov.br/dataset/fluxo-de-veiculo-por-hora.

HAGENAUER, F.; DRESSLER, F.; SOMMER, C. A Simulator for Heterogeneous Vehicular Networks. In: *6th IEEE Vehicular Networking Conference (VNC 2014), Poster Session*. Paderborn, Germany: IEEE, 2014. p. 185–186.

IBGE. 2009. URL: http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pof/2008_2009/.

JOHRI, R.; RAO, J.; YU, H.; ZHANG, H. A multi-scale spatiotemporal perspective of connected and automated vehicles: Applications and wireless networking. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, v. 8, n. 2, p. 65–73, Summer 2016. ISSN 1939-1390.

KAZMI, A.; KHAN, M. A.; AKRAM, M. U. Devanet: Decentralized software-defined vanet architecture. In: *2016 IEEE International Conference on Cloud Engineering Workshop (IC2EW)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 42–47.

KELLEY, D.; CHRISS, S.; SUMNER, R. *DSRC Implementation Guide*. [S.l.], 2010. 210 p. Disponível em: <https://standards.ieee.org/findstds/standard/802.11p-2010.html>.

MUSSA, S. A. B.; MANAF, M.; GHAFOOR, K. Z.; DOUKHA, Z. Simulation tools for vehicular ad hoc networks: A comparison study and future perspectives. In: *2015 International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–8.

NOORI, H.; VALKAMA, M. Impact of vanet-based v2x communication using ieee 802.11p on reducing vehicles traveling time in realistic large scale urban area. In: *2013 International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE)*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 654–661. ISSN 2378-1289.

NSHIMIYIMANA, A.; AGRAWAL, D.; ARIF, W. Comprehensive survey of v2v communication for 4g mobile and wireless technology. In: *2016 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1722–1726.

O Globo. 2015. URL: http://blogs.oglobo.globo.com/de-bike/post/estudo-aponta-que-uso-da-bicicleta-comomeio-de-transporte-dobrou-na-ultima-decada.html.

Oliver Goldsmith. 2017. URL: https://www.pensador.com/autor/oliver$_g oldsmith/$.

OpenStreetMap. 2017. URL: https://www.openstreetmap.org.

ROS, F. J.; MARTINEZ, J. A.; RUIZ, P. M. A survey on modeling and simulation of vehicular networks: Communications, mobility, and tools. *Computer Communications*, v. 43, p. 1 – 15, 2014. ISSN 0140-3664. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140366414000267>.

Sistema FIRJAN. 2015. URL: http://www.firjan.com.br/publicacoes/publicacoes-de-economia/o-custo-dos-deslocamentos-nas-principais-areas-urbanas-do-brasil.htm.

SOMMER, C.; GERMAN, R.; DRESSLER, F. Bidirectionally Coupled Network and Road Traffic Simulation for Improved IVC Analysis. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, IEEE, v. 10, n. 1, p. 3–15, January 2011.

SOUZA, A. M. de; YOKOYAMA, R. S.; MAIA, G.; LOUREIRO, A.; VILLAS, L. Real-time path planning to prevent traffic jam through an intelligent transportation system. In: *2016 IEEE Symposium on Computers and Communication (ISCC)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 726–731.

TomTom. 2016. URL: https://www.tomtom.com/en$_g b/traffic index/city/recife$.

Veins Website. 2017. URL: http://veins.car2x.org/.

VIVEK, N.; SRIKANTH, S. V.; SAURABH, P.; VAMSI, T. P.; RAJU, K. On field performance analysis of ieee 802.11p and wave protocol stack for v2v amp; v2i communication. In: *International Conference on Information Communication and Embedded Systems (ICICES2014)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–6.

ZHENG, K.; ZHENG, Q.; CHATZIMISIOS, P.; XIANG, W.; ZHOU, Y. Heterogeneous vehicular networking: A survey on architecture, challenges, and solutions. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 17, n. 4, p. 2377–2396, Fourthquarter 2015. ISSN 1553-877X.