TIAGO ALVES SILVA

**Modelos de aplicações baseadas em comunicação veicular para análise de
segurança de veículos autônomos**

São Paulo

2021

TIAGO ALVES SILVA

**Modelos de aplicações baseadas em comunicação veicular para análise de
segurança de veículos autônomos**

Versão Revisada

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Ciências

São Paulo

2021

TIAGO ALVES SILVA

**Modelos de aplicações baseadas em comunicação veicular para análise de
segurança de veículos autônomos**

Versão Revisada

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Ciências

Área de Concentração: Engenharia De
Computação

Orientador: Prof. Dr. João Batista Camargo
Junior.

São Paulo

2021

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Alves Silva, Tiago

Modelos de aplicações baseadas em comunicação veicular para análise de segurança de veículos autônomos / T. Alves Silva -- versão corr. -- São Paulo, 2021.

88 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais.

1.Simulação de Sistemas 2.Redes Veiculares 3.Segurança Crítica 4.Veículos Autônomos I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais II.t.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Lorivaldo e Márcia, e às minhas irmãs, Fabricia e Bruna, por todo o apoio e por sempre acreditarem em mim. À minha esposa Rachel, que me encorajou desde o princípio em realizar este trabalho. Te peço desculpas pela minha ausência ao longo desta pesquisa e agradeço sua paciência.

Ao meu orientador, Dr. João Batista Camargo Junior, muito obrigado pela orientação, conhecimento compartilhado e confiança em mim. Você sempre me motivou e me inspirou a melhorar cada vez mais o conteúdo deste trabalho. A você, meus mais sinceros agradecimentos!

Muito obrigado a todos membros do Grupo de Análise de Segurança da Escola Politécnica da USP (GAS) por me acolherem e sempre compartilharem comigo o conhecimento gerado por este grande time de pesquisa. Um especial agradecimento ao Lucio Vismari e Caroline Molina pela colaboração nesta pesquisa, ao Vinicius de Almeida por me incentivar a entrar no programa de pós-graduação e ao Gustavo Souza por me auxiliar na implementação dos modelos.

Agradeço ao LSI-TEC que me apoiou e possibilitou que eu conciliasse o trabalho na empresa com o desenvolvimento desta pesquisa.

Agradeço também à comunidade de desenvolvedores do Sumo e Veins por sempre estarem dispostos a tirar minhas dúvidas e pelas correções dos bugs que descobrimos nesses frameworks durante o desenvolvimento dos modelos. Em especial ao Jakob Erdmann e ao prof. Dr. Christoph Sommer.

RESUMO

Com a crescente complexidade do ambiente veicular, os futuros veículos autônomos não poderão utilizar apenas os dados adquiridos de seus sensores. Será necessário obter informações dos demais veículos de forma colaborativa para aumentar a consciência que cada veículo tem do ambiente que o rodeia. Com isso, os veículos autônomos poderão tomar decisões e atuar de forma mais segura a fim de evitar colisões. As redes de comunicação veicular possibilitam a criação de aplicações que monitoram situações de risco para o veículo. Dentre estas aplicações, duas se destacam por serem diretamente relacionadas com cenários que apresentam elevados índices de colisões entre veículos: O cenário de cruzamento de vias e o cenário de rodovias com pista única e duplo sentido de rodagem onde ocorrem manobras de ultrapassagem. Esta pesquisa propõe modelos computacionais capazes de simular o comportamento de veículos autônomos nestes dois cenários ao serem controlados por aplicações baseadas em comunicação veicular. Com esses modelos é possível avaliar a influência do sistema de comunicação na segurança destes veículos em diversas situações possíveis nesses cenários. Para isso, os modelos computacionais simulam as diferentes condições de via e de rede e monitora a ocorrência de colisões entre os veículos. Como resultado, a pesquisa mostra como os parâmetros de rede afetam diretamente o desempenho das aplicações e, consequentemente, sua capacidade de evitar colisões.

Palavras-Chave: Modelo de simulação computacional. Redes veiculares. Segurança. Veículos autônomos. Cruzamento de vias. Ultrapassagens.

ABSTRACT

With the growing complexity of the vehicle environment, future autonomous vehicles will not be able to use only the data acquired from their sensors. It will be necessary to obtain information from the other vehicles in a collaborative way to increase the awareness that each vehicle has of the environment that surrounds it. With this, autonomous vehicles will be able to make decisions and act safer in order to avoid collisions. Vehicle communication networks enable the creation of applications that monitor risk situations for the vehicle. Among these applications, two stand out for being directly related to scenarios that present high rates of collisions between vehicles: The scenario of crossing roads and the scenario of roads with a single lane and double direction of travel where overtaking maneuvers occur. This research proposes computational models capable of simulating the behavior of autonomous vehicles in these two scenarios when being controlled by applications based on vehicular communication. With these models it is possible to evaluate the influence of the communication system on the safety of these vehicles in several possible situations in these scenarios. For this, computational models simulate different road and network conditions and monitor the occurrence of collisions between vehicles. As a result, research shows how network parameters directly affect the performance of applications and, consequently, their ability to avoid collisions.

Keywords: Computer simulation model. Vehicular networks. Safety. Autonomous vehicles. Roads crossing. Overtaking.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Canais utilizados pelo sistema DSRC norte-americano.....	21
Figura 2 - Pilha de protocolos DSRC/WAVE e respectivas especificações	22
Figura 3 - Releases da 3GPP e suas principais tecnologias	25
Figura 4 - Modos de operação do D2D	26
Figura 5 - Camadas do protocolo LTE de User Plane à esquerda e Control Plane à direita	26
Figura 7 - Detecção de obstáculos por radares e câmera.....	29
Figura 8 - Comunicação veicular.....	30
Figura 9 - Cenário onde a carreta do veículo B bloqueia a comunicação entre os veículos A e C	32
Figura 10 – Arquitetura OMNeT++/Veins/SUMO	36
Figura 11 - Região interseção exibindo sua granularidade e exemplo de possíveis decisões de rota do veículo.....	42
Figura 12 - Cenário de interseção de vias.....	43
Figura 13 – Regiões da interseção de vias controlada pela RSU	45
Figura 14 - Simulação de tráfego no SUMO (à esquerda) e simulação de rede veicular no OMNeT++ (à direita)	49
Figura 15 - Tipos de manobra de ultrapassagem.....	51
Figura 16 - Trecho de pista simulado na ferramenta Sumo	52
Figura 17 - Regiões do modelo onde não é permitido realizar ultrapassagens.....	53
Figura 18 - Distância de Segurança	56
Figura 19 - Veículo rápido já ultrapassando veículo lento	59
Figura 20 - Distância entre os veículos	60
Figura 21 - Variação da velocidade durante duas manobras de ultrapassagens	62
Figura 22 – Futura distância de segurança	63
Figura 23 - Média de colisões para cada taxa de envio de BSM no modelo de interseção de vias	71
Figura 24 - Média de colisões para cada raio de comunicação no modelo de interseção de vias.....	72
Figura 25 - Média de colisões para cada latência da comunicação no modelo de interseção de vias	73

Figura 26 - Média de colisões para cada taxa de envio de BSM no modelo de ultrapassagens.....	75
Figura 27 - Média de colisões para cada raio de comunicação no modelo de ultrapassagens.....	76
Figura 28 - Média de colisões para cada latência da comunicação no modelo de ultrapassagens	77
Figura 29 - Proposta da FCC para a frequência antes alocada ao DSRC	82

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
ABS	Anti-lock Braking System
ACUTA	Autonomous Control of Urban Traffic
ARQ	Automatic Repeat request
AS	Access Stratum
BSM	Basic Safety Message
CALM	Communications Access for Land Mobiles
CAM	Cooperative Awareness Message
CAMP	Crash Avoidance Metrics Partnership
CCH	Control Channel
CR	Control Region
DICA	DTOT-based Intersection Control Algorithm
DOT	Department of Transportation
DS	Distância de Segurança
DSRC	Dedicated Short-Range Communications
EMM	EPS Mobility Management
EPS	Evolved Packet System
ESM	EPS Session Management
ESREL	European Safety and Reliability Conference
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FCC	Federal Communications Commission
FCFS	First Come, First Served
GAS	Grupo de Análise de Segurança
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GUI	Graphical User Interface
HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request
IDE	Integrated Development Environment
IMA	Intersection Movement Assist
IP	Internet Protocol
ISO	International Organization for Standardization

ITS	Intelligent Transport Systems
IR	Intersection Region
NHTSA	National Highway Traffic Safety Administration
LIDAR	Light Detection and Ranging
LLC	Logical Link Control
LTE D2D	Long Term Evolution Device to Device
MAC	Medium Access Control
MANET	Mobile Ad Hoc Network
NAS	Non-access Stratum
OBU	On-Board Unit
PDCP	Packet Data Convergence Protocol
PHY	Physical Layer
Radar	Radio Detection and Ranging
RLC	Radio Link Control
RoHC	Robust Header Compression
RRC	Radio Resource Control
RRM	Radio Resource Management
RSU	Road Side Unit
SAE	Society of Automotive Engineers
SCH	Service Channel
SSO	Standards Setting Organization
SUMO	Simulation of Urban Mobility
TB	Transport Block
TCP	Transmission Control Protocol
TraCI	Traffic Control Interface
UE	User Equipment
UDP	User Datagram Protocol
V2I	Vehicle to Infrastructure
V2N	Vehicle to Network
V2P	Vehicle to Pedestrians
V2V	Vehicle to Vehicle
V2X	Vehicle to Everything
VANET	Vehicular Ad-Hoc Network

Veins	Vehicles in Network Simulation
VLC	Visible Light Communication
VRU	Vulnerable Road User
WAVE	Wireless Access in Vehicular Environments
WiFi	Wireless Fidelity
WLAN	Wireless Local Area Network
WSA	Wave Service Advertisement
WSMP	WAVE Short Message Protocol

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivo	15
1.2	Motivação	15
1.3	Método de pesquisa	16
1.4	Estrutura da pesquisa	17
2	REVISÃO DA LITERATURA	18
2.1	Dedicated Short-Range Communications/Wireless Access in Vehicular Environments (DSRC/WAVE)	20
2.2	Long Term Evolution Device to Device (LTE D2D)	23
2.3	Segurança na Comunicação Veicular	28
2.4	Ferramentas de Simulação	33
3	REQUISITOS E LIMITAÇÕES DO SISTEMA DE SIMULAÇÃO	37
4	MODELO COMPUTACIONAL PARA SIMULAÇÃO DE INTERSEÇÃO DE VIAS	41
5	MODELO COMPUTACIONAL PARA SIMULAÇÃO DE CONTROLE DE ULTRAPASSAGENS	50
6	ANÁLISE DOS DADOS	65
6.1	Modelo de controle de interseção de vias	70
6.2	Modelo de controle de ultrapassagens	74
7	CONCLUSÃO	80
7.1	Trabalhos futuros	81
	REFERÊNCIAS	84

1 INTRODUÇÃO

O trânsito de veículos se torna cada vez mais complexo, principalmente nos grandes centros. O crescente número de veículos traz consigo o aumento dos acidentes de trânsito (AZEVEDO, CONTARATO e SANCHES, 2019). Por isso, a segurança veicular se torna cada vez mais um tema de grande relevância tanto no meio acadêmico quanto na indústria de veículos terrestres. Seu objetivo é a redução não só das colisões entre veículos, mas também entre estes e todos os demais elementos do ambiente veicular, como pedestres e ciclistas, por exemplo. Também pertence ao escopo da segurança veicular a mitigação dos danos causados por tais colisões.

Nesse contexto, o conceito de Intelligent Transportation System (ITS) define a utilização de uma série de aplicações computacionais que tem como objetivo melhorar a segurança e a eficiência dos sistemas de transporte, além de melhorar a experiência de condução (DOMIN, 2010). Dentre essas aplicações, as baseadas em comunicação veicular se destacam pelo seu potencial em cumprir os objetivos dos sistemas ITS. Os sistemas de comunicação possibilitam a troca de mensagens de forma confiável e precisa entre veículos, ou vehicle to vehicle (V2V), entre os veículos e a infraestrutura da via, ou vehicle to infrastructure (V2I), entre os veículos e os pedestres, ou vehicle to pedestrians (V2P). A definição de V2P também se estende a todos os demais usuários da via que são vulneráveis, se comparados ao veículo, na ocorrência de uma colisão, os denominados Vulnerable Road Users (VRU) (SEWALKAR e SEITZ, 2019). Ciclistas e pessoas usando skates ou patinetes são exemplos de VRUs. Além da comunicação entre esses elementos do ambiente veicular, o conceito de comunicação veicular busca conectar o veículo a outros elementos, como a internet. Para compreender esse conjunto de modos de comunicação, entre o veículo e os outros elementos do ambiente veicular, emprega-se o conceito de vehicle to everything (V2X).

Os sistemas de comunicação V2X criam a possibilidade do veículo se conectar ao ambiente ao seu redor não só para identificá-lo, mas também para interagir com ele através de troca de mensagens informativas e de controle. Isso possibilita que o veículo tenha dados do ambiente que são muito importantes tanto para os veículos atuais, visto que estes podem apresentar informações importantes ao condutor,

quanto para os futuros veículos autônomos que podem utilizar tais dados durante a tomada de decisões.

As pesquisas desenvolvidas atualmente apontam como principais fontes de informações para os veículos autônomos os dados obtidos por sensores on-board como câmeras óticas, radar e o Light Detection and Ranging (lidar) (HARDING, POWELL, *et al.*, 2014). A consciência situacional desses veículos pode ser aumentada com a utilização dos sistemas V2X através de sua capacidade de identificar objetos além da linha de visão dos sistemas de detecção on-board (HARDING, POWELL, *et al.*, 2014). Com isso, é possível antecipar possíveis situações de perigo para o veículo e, conseqüentemente, para seus ocupantes.

Os sistemas de comunicação veicular vêm sendo estudados a um algum tempo. O governo norte-americano, por exemplo, conduz pesquisas sobre sua adoção desde a década de 90 (AUER, FEESE e LOCKWOOD , 2016). Com base nos resultados já obtidos de testes desses sistemas, o Departamento de Transportes norte-americano avalia a possibilidade de exigir que todos os veículos produzidos nos Estados Unidos da América já tenham o sistema embarcado. Já os veículos que não foram fabricados com o sistema também podem receber dispositivos que possibilitem inseri-los nessa rede veicular (NHTSA, 2016).

De forma geral, espera-se que esse tipo de sistema possa evitar colisões, nos mais diversos cenários, através de aplicações que monitorem o veículo e o ambiente ao seu redor. No entanto, para que essas aplicações baseadas em comunicação sejam implantadas nos veículos é necessário avaliá-las e estabelecer requisitos mínimos necessários para seu funcionamento seguro. O sistema de comunicação deve atender a esses requisitos de segurança mesmo em cenários degradados.

Para avaliar tais sistemas e seu potencial as simulações computacionais são uma opção muito adotada pelo fato de fornecer um ambiente controlado de análise. Além disso, a simulação possibilita testes de diferentes cenários muitas vezes inviáveis em um teste com veículos reais (MOTRO, CHU, *et al.*, 2016).

Diante disso, essa pesquisa apresenta duas aplicações desenvolvidas em um ambiente de simulação veicular. Neste sistema computacional são simuladas as características e comportamentos de veículos autônomos que executam os comandos gerados por tais aplicações. Além disso, as características de comunicação veicular também são simuladas pelo sistema. Com isso, é possível avaliar tanto as

características de rede quanto diferentes configurações de cenários automotivos onde as aplicações podem trazer ganhos ao evitar colisões entre veículos.

1.1 Objetivo

O principal desafio das tecnologias de comunicação veicular é desenvolver uma rede robusta e escalável que ofereça alta vazão e baixa latência para as aplicações de segurança (LI, 2015). Com isso, estas aplicações terão meios que as possibilitem trocar informações de forma confiável. Consequentemente, tal sistema será capaz de reduzir o número de colisões que existe atualmente e salvar vidas. Portanto, essa pesquisa busca elaborar uma ferramenta robusta que possa ser utilizada na análise de segurança desses cenários. Também faz parte do escopo deste trabalho avaliar os dados gerados por esse simulador de forma a melhor compreender a utilização dessa tecnologia.

Esta pesquisa tem como principal objetivo o desenvolvimento de modelos computacionais de simulação capazes de fornecerem dados para uma avaliação de risco de colisão entre veículos autônomos em dois cenários específicos: o cruzamento de vias e a manobra de ultrapassagens controlados por aplicações baseadas em sistemas de comunicação. Estes cenários mostram-se relevantes por serem apontados pela literatura como trechos de via com elevado número de colisões (MICULESCU e KARAMAN, 2020) (MOTRO, CHU, *et al.*, 2016).

O objetivo secundário desta pesquisa é estabelecer requisitos mínimos de comunicação necessários para aplicações de segurança baseadas em V2I e V2V. A partir da avaliação do modelo proposto, com base nos parâmetros analisados e na configuração aplicados ao modelo, estipular valores para tais parâmetros que a aplicação necessita que sejam atendidos pelo sistema de comunicação.

1.2 Motivação

O ambiente veicular vem cada vez mais ganhando destaque, principalmente com a expectativa existente em relação ao desenvolvimento dos veículos autônomos. Entidades governamentais, grupos de pesquisa científica, empresas privadas tanto do ramo automobilístico quanto de telecomunicações estão envolvidas no

desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias com o objetivo de que tais veículos estejam realmente presentes nas ruas.

Para que isso ocorra um dos requisitos necessários é um eficiente e seguro modo detecção de obstáculos. As principais linhas de pesquisa existentes nessa área objetivam o desenvolvimento de sistemas de sensores, câmeras e radares capazes de mapear o ambiente ao redor de veículo e identificar possíveis obstáculos. Tais dispositivos on-board são caracterizados por um modo de operação *standalone*, ou seja, não necessitam de outra fonte de informações externa para funcionarem. Entretanto, por mais eficientes que sejam tais dispositivos, seu campo de detecção se limita a apenas algumas dezenas de metros a partir do ponto onde são instalados no veículo. Além desse fator limitante, tais sensores também apresentam a limitação de não conseguirem detectar obstáculos encobertos por outros mais próximos (HARDING, POWELL, *et al.*, 2014).

Os sistemas de comunicação veicular apresentam um modo de operação colaborativo. Cada nó, representado pelo elemento do ambiente veicular, se conecta aos demais criando uma rede de troca de informações. Essa rede tem a capacidade de sobrepor às limitações dos sensores on-board dando maior consciência situacional a cada nó.

As principais situações de risco envolvendo os veículos podem ser detectadas pelos sensores on-board, mas, em determinados casos, sem tempo hábil para evitar uma colisão. Por ter um alcance maior, o sistema de comunicação tem a capacidade de antecipar essas situações e possibilitar que o veículo realize alguma ação prévia que evite a colisão.

Diante dessas características, tais sistemas de comunicação podem trazer significativos ganhos na segurança do ambiente veicular como um todo. Portanto, essa pesquisa também busca avaliar e definir métricas para as características do sistema de comunicação que resultam nesses ganhos de segurança.

1.3 Método de pesquisa

Esta pesquisa utiliza como fonte os dados provenientes de dois modelos computacionais propostos. Cada modelo é composto por dois ambientes de simulação independentes, mas inteiramente interligados: a simulação da rede de telecomunicação veicular e a simulação do ambiente veicular. A aplicação que

controla o cenário está presente na camada de aplicação da simulação da rede de comunicação e envia comandos de controle para a simulação dos veículos. Em contrapartida, a rede de comunicação usa os dados provenientes da simulação veicular para compor suas mensagens e transmiti-las na rede.

Uma das primeiras tarefas dessa pesquisa foi, com base na literatura, avaliar as ferramentas de simulação existentes e selecionar a que melhor atendia as necessidades iniciais. A partir dessa pesquisa inicial e levantamento das principais ferramentas computacionais de simulação selecionou-se as mais relevantes para testes e selecionou-se a combinação OMNeT++/Veins/SUMO.

A partir de então a pesquisa passou a implementar os modelos selecionados com base nas suas características que permitiam o emprego dos modos de comunicação V2V e V2I (modelo de ultrapassagem e modelo de controle de interseção, respectivamente) e que mais poderiam ser beneficiados por tais tecnologias.

Por fim, foram utilizadas as métricas de rede veicular para demonstrar a capacidade de análise dos modelos propostos.

1.4 Estrutura da pesquisa

Os demais capítulos desta pesquisa estão organizados da seguinte forma: O capítulo 2 apresenta a revisão da literatura realizada descrevendo o sistema de comunicação veicular e suas principais tecnologias de rádio, o DSRC (ou ITS-G5, que é sistema semelhante desenvolvido na União Europeia), o LTE D2D e tecnologias alternativas que também podem ser empregadas. A última sessão deste capítulo descreve a relação da segurança com a comunicação veicular abordando as principais características do sistema de comunicação que podem afetar a segurança do veículo autônomo. O capítulo 3 trata dos requisitos e das limitações do sistema de simulação desenvolvido. O capítulo 4 aborda o modelo computacional desenvolvido no primeiro cenário adotado neste trabalho, a interseção de vias, bem como o sistema de controle baseado em comunicação V2I proposto para esse cenário. Já o capítulo 5 apresenta o modelo computacional desenvolvido no segundo cenário de interesse do trabalho, o controle de ultrapassagens, e seu sistema de comunicação V2V. O capítulo 6 apresenta a análise dos dados coletados nas simulações realizadas. Por fim, no capítulo 7 estão a conclusão, as considerações finais desta pesquisa além de trabalhos futuros que podem ser investigados.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Órgãos governamentais, grupos de pesquisa e especificação de protocolos de rede desenvolvem o ITS em várias partes do mundo. Um dos projetos de especificação de ITS mais abrangentes é o desenvolvido pelo grupo TC204 WG16 da International Organization for Standardization (ISO). Esse grupo especifica um framework que integra uma variedade de padrões de comunicação denominado Communication Access for Land Mobile (CALM). O CALM define que tecnologias de rádio como redes celulares, Wireless Local Area Network (WLAN), DSRC/WAVE, Bluetooth, entre outras, compõem uma infraestrutura de comunicação que é desacoplada das aplicações ITS (LI, 2015). Essa abordagem tem como principal característica a possibilidade de prover mais de um meio de acesso para a aplicação de acordo com as condições do meio de comunicação e o alcance desejado para a mensagem a ser transmitida.

Dentre os protocolos de telecomunicação do CALM, dois se destacam tanto no meio acadêmico, que os apontam como as principais tecnologias de comunicação ITS (CECCHINI, BAZZI, *et al.*, 2017), quanto por órgãos governamentais que os utilizam em suas soluções de ITS locais: O DSRC/WAVE e o LTE D2D.

A rede DSRC/WAVE vem sendo desenvolvida e testada pela National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), que é uma agência ligada ao Departamento de Transportes norte-americano responsável pela regulação da segurança de automóveis, desde a década de 90. Essa rede se baseia nos padrões IEEE 802.11P e IEEE 1609. Estes padrões também são utilizados na rede ITS-G5 desenvolvida pela União Europeia através da European Telecommunications Standards Institute (ETSI). As redes celulares também receberam o suporte à comunicação direta entre os nós da rede. Desde a release 12 de suas especificações, a 3rd Generation Partnership Project (3GPP), que é a entidade responsável pela especificação técnica das redes celulares, incluiu este modo de comunicação na rede LTE. Isto deu base para a comunicação V2X entre veículos equipados com sistema de comunicação LTE. O principal ganho neste modo de comunicação entre nós LTE é a redução na latência de comunicação observada nesta rede pois as mensagens trocadas não trafegam através do núcleo da rede para alcançarem o destinatário. Esta característica é muito

significativa principalmente para a comunicação veicular pois a aproxima de uma comunicação em tempo real (MAGALHAES, D'OREY, *et al.*, 2020)..

Outra tecnologia de comunicação que pode ser empregada para comunicação veicular é a Visible Light Communication (VLC). Na VLC, a luz visível é utilizada como meio de comunicação. Nesse caso, o transmissor utiliza um emissor de pulsos de luz, geralmente um LED. Esses pulsos de luz são captados por um receptor, instalado nos veículos receptores, que filtra o sinal recebido das demais fontes de luz do ambiente e interpreta o sinal recebido. Esse tipo de comunicação apresenta vantagens em relação às tecnologias de comunicação por rádio como ausência de necessidade de uma licença de utilização de uma banda de rádio (KOMINE e NAKAGAWA, 2004). Também apresenta uma boa taxa de transferência de dados e grande largura de banda. Por outro lado, ela apresenta desvantagens que impossibilitam sua utilização como única fonte de comunicação veicular, como curto alcance, necessidade de alinhamento entre emissor e receptor e sofrer interrupção abrupta da comunicação em cenários de oclusão da visada direta entre emissor e receptor por outros veículos. Diante disso, essa tecnologia geralmente é proposta como sendo um modo de comunicação aplicado em conjunto com outro baseado em comunicação de rádio, como o LTE D2D (YUE, WU e CUI, 2017) ou o DSRC/WAVE (CAILEAN, CAGNEAU, *et al.*, 2014). Nesses casos, o VLC é adotado em cenários onde a comunicação de rádio sofre degradação.

As aplicações baseadas em comunicação não são mandatórias (reguladas) pela NHTSA ou outro órgão normativo, mas esta entidade acredita que seu número irá crescer à medida que a tecnologia se desenvolver e garantir certos níveis de confiabilidade e desempenho. A entidade acredita que esses aplicativos baseados em comunicação tem a capacidade de reduzir consideravelmente a ocorrência e a severidade dos acidentes veiculares além de reduzir os custos causados por tais acidentes.

De uma forma geral, a implantação das redes de comunicação veicular é um desafio para a segurança do veículo e, conseqüentemente, de seus ocupantes. Por mais que seja apenas mais uma fonte de informação (visto que deve ser aplicado em conjunto com outros sistemas on-board, como radares e câmeras, para os veículos autônomos), o sistema de comunicação é um sistema associado à segurança do veículo. Este sistema fornece dados para a identificação de obstáculos que possam

eventualmente colidir com o veículo. De toda forma, o sistema de comunicação é um sistema crítico em segurança para os modelos propostos visto que, neste caso, ele é o único mecanismo de detecção de obstáculos. Nestes modelos o sistema de controle do veículo depende inteiramente das informações fornecidas. Portanto, quando este sistema apresenta alguma falha, seja pela interrupção do serviço ou pela transmissão de informações com erros ou desatualizadas (causada por delay), o veículo pode ser levado a um estado inseguro. Adicionalmente, nos cenários avaliados não há uma medida corretiva para um estado inseguro causado por falha no sistema de comunicação. No contexto do transporte rodoviário uma medida como parar o veículo não pode ser aplicada para falhas no sistema de comunicação. Principalmente em um veículo autônomo que apresenta outros sensores para detecção de obstáculos.

2.1 Dedicated Short-Range Communications/Wireless Access in Vehicular Environments (DSRC/WAVE)

As aplicações ITS de segurança fazem uso de informações de status dos veículos próximos (como velocidade, posição, aceleração, dimensões, entre outras) para gerar alertas para motoristas humanos ou veículos autônomos. Os sistemas de comunicação que dão suporte a essas aplicações se basearam no conceito de redes ad hoc. Redes ad hoc são caracterizadas por sua topologia distribuída que dispensa a utilização de um nó que concentra todas as mensagens da rede e as encaminha para seus destinos (o denominado ponto de acesso).

Nas redes ad hoc cada nó encaminha os pacotes para os nós vizinhos de forma colaborativa. Essas redes geralmente não tem uma topologia pré-determinada. Essa característica é mais expressiva na sua variação denominada MANET (do inglês mobile ad hoc network). Nas MANETs os nós da rede são móveis. Isso faz com que a topologia da rede mude constantemente de acordo com a movimentação de seus nós. Dessa forma, em determinadas situações pode ser necessário mais de um salto (hop) para que uma mensagem chegue a seu destino ou pode até ocorrer a impossibilidade de comunicação quando o destinatário não se encontra dentro da área de comunicação do emissor e não exista uma rota multi-salto capaz de alcançá-lo. As VANETs (do inglês Vehicular Ad Hoc Networks) são redes MANETs onde os nós são veículos ou outros elementos do sistema veicular, como as denominadas RSUs (do inglês Road Side Unit). A topologia das VANETs se limita às proximidades das vias

visto que os veículos trafegam pela malha viária pré-existente e estes representam os nós da rede.

Dentre as propostas de redes VANETs, as que se destacam são as baseadas nos protocolos IEEE 802.11p e IEEE 1609. Existem diferentes sistemas que implementam esses tipos de VANETs. No programa ITS norte-americano, o sistema DSRC/WAVE é uma rede VANET que implementa esses protocolos de rede e opera em um espectro de 75 MHz alocados pela agência reguladora de telecomunicações norte-americana Federal Communications Commission (FCC) na banda de 5.9 GHz. Este espectro alocado para ITS é composto por 7 canais de 10 MHz e um banda de guarda de 5 MHz, como é mostrado na figura 1. Os canais 174 e 176 e os canais 180 e 182 podem ser combinados formando canais de 20 MHz. Um dos canais (canal 178) é utilizado para sinalização de controle, o denominado Control Channel (CCH), e os demais para tráfego de dados, os Service Channels (SCH). Dos canais SCHs, dois deles são usados exclusivamente para aplicações de safety (canais 172 e 184) e os demais para aplicações non-safety. Aplicações non-safety englobam aquelas destinadas à melhoria da mobilidade e fornecimento de conectividade ao veículo. O sistema DSRC também permite à utilização comercial dos canais non-safety para divulgação de serviços.

Figura 1 - Canais utilizados pelo sistema DSRC norte-americano

Frequência (MHz)	5850	5855	5865	5875	5885	5895	5905	5915	5925
Número do canal	Guard band	172	174	176	178	180	182	184	
			175			181			
Utilização		SCH	SCH	SCH	CCH	SCH	SCH	SCH	

Fonte: Li (LI, 2015)

Outro sistema que implementa uma rede VANET foi elaborado na Europa pela ETSI e é denominado ITS-G5. Este sistema opera em um espectro de 30 MHz também alocado na banda de 5.9 GHz. O termo G5 faz referência exatamente à banda alocada para esse sistema ITS.

O protocolo IEEE 802.11p é uma adaptação do protocolo IEEE 802.11 (o protocolo das redes Wi-Fi) para comunicação veicular. Como é mostrado na figura 2, ele

compreende as especificações da camada Physical Layer (PHY) e parte da camada Media Access Control (MAC) da pilha de protocolos. Entretanto, algumas adaptações foram incluídas no protocolo Wi-Fi para o ambiente veicular pois este apresenta características específicas como alta mobilidade dos nós da rede, comunicação em condições de non-line-of-sight (onde há algum obstáculo entre emissor e receptor do sinal) e cenários de alta densidade de nós da rede (WU, SUBRAMANIAN, *et al.*, 2013). A família de protocolos IEEE 1609 especifica parte da camada MAC, as camadas Logical Link Control (LLC) e WAVE Short Message Protocol (WSMP) e as funções de segurança da comunicação (security). Por fim, a especificação J2735 da SAE define um conjunto de mensagens e seu conteúdo que são trocadas entre os nós da rede a fim de fornecer os dados necessários para as aplicações de segurança presentes nas roadside units (RSU) e on-board units (OBU) do sistema.

Figura 2 - Pilha de protocolos DSRC/WAVE e respectivas especificações

Fonte: Adaptado de IEEE (IEEE, 2014)

Tais informações definidas pela SAE J2735 são enviadas periodicamente em forma de broadcast por cada veículo com a intenção de anunciar sua presença aos demais elementos de via dentro de sua área de comunicação. A mensagem que transporta tais informações é denominada Basic Safety Message (BSM) pelo sistema de

comunicação norte-americano DSRC/WAVE ou Cooperative Awareness Message (CAM) pelo sistema de comunicação europeu ETSI ITS-G5.

As mensagens trocadas em V2X por esse sistema diferem dos sistemas de comunicação tradicionais não só pela forma de comunicação direta entre seus nós, mas também pelas características das mensagens trocadas. As mensagens BSM, ou CAM, têm escopo local, ou seja, apenas são válidas dentro de uma área geográfica ao entorno da posição onde foi gerada. A mensagem é enviada periodicamente em forma de broadcast e deve atender os requisitos de baixa latência e alta confiabilidade necessários para as aplicações de segurança que utilizam as informações transmitidas para gerar alertas aos motoristas humanos ou sistemas de controle dos veículos autônomos.

O sistema DSRC/WAVE é composto por dois tipos de unidades de comunicação: as RSUs e as OBU. As RSUs são instaladas em pontos estratégicos da via, como em cruzamentos ou em locais onde a velocidade máxima permitida sofre alteração, e as OBUs são instaladas nos veículos. Dessa forma, o modo de comunicação suportado por esse sistema é entre OBUs (V2V) e entre OBUs e RSUs (V2I).

Sistemas de comunicação veicular baseados em 802.11p já são adotados em veículos de algumas partes do mundo. A Toyota foi a primeira fabricante de automóveis a adotar a tecnologia nos veículos do mercado japonês em 2015. A Cadillac implantou o sistema DSRC no modelo CTS para o mercado norte-americano em 2017. Posteriormente a Volkswagen também decidiu equipar o Golf em 2019 com o sistema ITS-G5 para a Europa (ABUELSAMID, 2019). A Toyota e a Lexus também planejam implantar o sistema DSRC para os veículos norte-americanos em grande escala a partir de 2021 (SLOVICK, 2018). A General Motors pretende adotar a comunicação veicular a partir de 2023, mas não anunciou a tecnologia a ser implantada.

2.2 Long Term Evolution Device to Device (LTE D2D)

As redes celulares têm o objetivo de conectar dispositivos moveis, ou User Equipment (UEs), entre si e com a rede mundial de computadores. Para cumprir essa finalidade tais redes evoluíram consideravelmente com o passar do tempo. Essas redes são organizadas em gerações que vão desde a primeira versão da rede (1G) até a atual quinta geração (5G). Em cada nova geração várias tecnologias são implantadas com

a finalidade de comportar mais usuários conectados, aumentar a taxa de transferência de dados, diminuir a latência da comunicação, prover maior mobilidade aos usuários e segurança para a comunicação.

Uma das tecnologias que foram inseridas na quarta geração (4G) das redes celulares permite a comunicação direta entre os UEs (GANDOTRA e JHA, 2016). Esse modo de comunicação, denominado device to device (D2D), foi inicialmente planejado com a finalidade de permitir comunicação pública de segurança. Tal rede se propõe a ser utilizada para comunicação unificada entre órgãos públicos de segurança, como bombeiros e polícia, possibilitando os denominados Proximity Services (ProSe). O ProSe pode ser essencial em situações onde a disponibilidade da rede celular pode ser comprometida, como na ocorrência de desastres naturais que afetem a rede celular, por exemplo. Nesses cenários, os dispositivos podem manter a comunicação mesmo sem o controle da rede celular através da comunicação direta entre os UEs. Além dessa característica, um dos principais motivos para a utilização da comunicação direta entre nós da rede celular 4G foi a heterogeneidade dos sistemas de comunicação críticos em segurança utilizados pelos órgãos de segurança pública. O ProSe pode unificar a comunicação entre tais órgãos em uma única tecnologia.

A comunicação direta através da ProSe se caracteriza por duas funções principais que foram incluídas na rede 4G tradicional para dar suporte a essa tecnologia. A primeira é o mecanismo de busca que permite que um dispositivo ProSe consiga identificar outros dispositivos que suportam a tecnologia e estabelecer um canal de comunicação. A segunda é a comunicação direta que se dá através deste canal direto, denominado sidelink. Cada uma dessas funções desenvolvidas pelos dispositivos ProSe apresenta desafios técnicos que a 3GPP busca solucionar ao longo de suas especificações. A 3GPP é uma organização que desenvolve especificações técnicas que são formalizadas em padrões das redes celulares pelas organizações de desenvolvimento de padrões, ou Standards Setting Organizations (SSOs). As especificações técnicas das redes celulares são compostas por uma série de documentos elaborados por essa entidade e disponibilizados em releases. Como mostra a figura 3, a tecnologia ProSe foi apresentada inicialmente no release 12 das especificações 3GPP. No entanto, assim como as outras tecnologias, a ProSe recebe melhorias e correções nos releases posteriores à medida que suas especificações são avaliadas e testadas pelos membros da 3GPP.

Figura 3 - Releases da 3GPP e suas principais tecnologias

Fonte: Descrição da 3GPP (**3GPP, 2019**)

O ProSe, e em especial o LTE D2D, se mostra essencial para os objetivos das redes 5G pois esse modo de comunicação tem boa capacidade de reuso dos recursos de rede, redução no tráfego de dados transportados pelo Core Network e na latência da comunicação, dentre outras características (GALLO e HÄRRI, 2014). As redes anteriores à rede 5G têm uma forte dependência da Estação Rádio Base (ERB) e do Core Network apresentando, dessa forma, uma arquitetura centralizada. Já as redes 5G vem sendo definidas com uma arquitetura distribuída onde os próprios dispositivos controlam a rede (GANDOTRA e JHA, 2016). A ERB e o Core Network ainda estão presentes e continuam atuando diretamente no controle da rede. No entanto, os sistemas D2D tem a capacidade de se auto organizarem na falta de conexão com uma ERB, aumento assim sua disponibilidade. Dessa forma o sistema D2D pode atuar nos cenários apresentados pela figura 4, respectivamente: dentro da área de cobertura da ERB, fora da área de cobertura da ERB e parcialmente dentro da área de cobertura da ERB (onde um dos dispositivos se encontra dentro da área de cobertura e o outro não).

Figura 4 - Modos de operação do D2D

Fonte: Adaptado de SchlienZ (**SCHLIENZ e ROESSLER, 2016**)

Em um cenário onde ambos os UEs estão dentro da área de cobertura a ERB apenas coordena a alocação de recursos para a comunicação, que é feita diretamente entre o par de UEs. Ou seja, os canais de controle são estabelecidos com a ERB e os canais de dados são estabelecidos entre os UEs. Nos demais cenários os UEs devem estabelecer em conjunto os recursos necessários para a comunicação. Um requisito adicional ocorre no cenário de cobertura parcial onde os recursos definidos pelos pares devem estar de acordo com o estabelecido pela ERB para o dispositivo dentro da área de cobertura (SCHLIENZ e ROESSLER, 2016).

Esse modo de comunicação direta em rede celular pode apresentar diferentes casos de uso. Dentre eles, os que mais se destacam são os serviços de segurança pública (principal aplicação destacada pela 3GPP através do ProSe), distribuição de conteúdo, comunicação celular em cenários sem cobertura de rede e comunicação V2X. Entretanto, para que esse modo de comunicação D2D seja aplicado na comunicação V2X, rigorosas métricas de latência e confiabilidade da comunicação devem ser atendidas (SUN, STRÖM, *et al.*, 2014).

Figura 5 - Camadas do protocolo LTE de User Plane à esquerda e Control Plane à direita

Fonte: Próprio autor

A rede LTE é estruturada em dois domínios principais: o Control Plane e o User Plane, como pode ser observado na figura 5. O Control Plane compreende as funções de sinalização necessárias para estabelecer e manter a conexão entre o dispositivo móvel, ou user equipment (UE) do termo em inglês, e a rede. Já o User Plane engloba as funções responsáveis por transmitir os dados das aplicações (SONG, FANG, *et al.*, 2017). Embora tenham finalidades distintas, a arquitetura do Control Plane e do User Plane utilizam as mesmas camadas da pilha de protocolos da rede. Só apresentando alguns elementos específicos para cada domínio: O User Plane é organizado em 4 principais camadas enquanto o Control Plane apresenta 2 camadas adicionais, como mostra a figura 5. A camada PDCCP (Packet Data Convergence Protocol), no User Plane, recebe os pacotes IP a serem transmitidos das aplicações. As principais funcionalidades desta camada são fazer a proteção de integridade (apenas em Control Plane), a detecção de pacotes duplicados, a compressão do cabeçalho utilizando o protocolo RoHC (Robust Header Compression) e a cifragem do pacote. A camada RLC (Radio Link Control) é responsável pela correção de erro através do método ARQ (Automatic Repeat reQuest), entrega em sequência dos pacotes, concatenar os SDUs do mesmo radio bearer, segmentação dos pacotes de acordo com o tamanho do TB (Transport Block). A camada MAC (Media Access Control) realiza a multiplexação e demultiplexação dos PDUs da camada RLC, seleção do canal lógico a ser utilizado, correção de erro utilizando HARQ (Hybrid Automatic Repeat Request). A camada física (PHY) é responsável pela transmissão dos pacotes no meio físico (MOUSAVI, AMIRI, *et al.*, 2019).

No Control Plane existem duas camadas adicionais. O Radio Resource Control (RRC) é um protocolo a nível de camada de rede responsável por estabelecer, manter e encerrar uma conexão de rádio. Também é de responsabilidade da RRC gerir a conexão no contexto de mobilidade do UE.

O Control Plane da rede LTE também tem uma camada denominada Non-access Stratum (NAS). O NAS tem a função de gerir a mobilidade do UE, denominada EPS (Evolved Packet System) Mobility Management (EMM), e a sessão de transferência de dados estabelecida entre UE e Rede, a EPS Session Management (ESM). A camada NAS é assim chamada por conectar o UE diretamente ao núcleo da rede. Já a camada Access Stratum (AS) compreende os protocolos necessários para

transportar as mensagens NAS através da rede de acesso (OLSSON, SULTANA, *et al.*, 2013).

Uma característica da comunicação D2D que pode afetar diretamente sua aplicação em V2X é a interferência da rede celular. Como os dois modos de comunicação compartilham os mesmos recursos existe a necessidade de um controle da alocação de recursos rigoroso afim de evitar que a interferência entre eles afete a capacidade de comunicação de ambos. A comunicação D2D tem o objetivo de reutilizar os recursos da rede celular. Portanto, a ERB deve alocar os recursos de comunicação D2D que não estão sendo utilizados pela rede celular. Em cenários onde a ERB não controla a alocação de recursos os UEs devem estipular os recursos a serem utilizados para comunicação a partir do modo de operação que a possível rede celular existente está utilizando. A alocação de recursos para a comunicação é feita pela Radio Resource Management (RRM). A maioria das estratégias de RRM prioriza os links da rede celular (SUN, STRÖM, *et al.*, 2014). Entretanto a comunicação D2D deve apresentar um desempenho que comporte a comunicação V2X. Portanto, esse desempenho deve ser considerado na alocação de recursos pela RRM se uma comunicação V2X fará uso dessa conexão D2D.

Outra área que deve ser beneficiada pela comunicação V2X em rede celular é a de aplicações comerciais. A extensão das conexões V2X para além do V2V, V2I e V2P já definidos para o DSRC traz essa nova aplicação. Com o V2N (Vehicle to Network) o veículo poderá prover suporte a aplicações comerciais além de fornecer conexão com a internet para os ocupantes do veículo.

A utilização das redes LTE para V2X vem sendo estudadas em alguns países como China, Japão e Estados Unidos, além de alguns países europeus. Na China, por exemplo, a utilização de V2X em LTE já se encontra em fase de padronização e alocação de frequência para os veículos conectados (3GPP 2017). A Ford anunciou a decisão de adotar a tecnologia C-V2X em seus modelos, mas ainda sem data definida (SLOVICK, 2018). A Audi incluiu V2I nos modelos A4, Q7 e linha Allroad via LTE em um sistema denominado Traffic Light Information que permite comunicação com os semáforos da cidade de Las Vegas em 2017 (GODUTO e DAHNCKE, 2016).

2.3 Segurança na Comunicação Veicular

O sistema de comunicação veicular é visto como um sistema revolucionário no âmbito da segurança veicular. O DSRC vem sendo testado pelo departamento de transportes norte-americano (USDOT, sigla do termo em inglês U.S. Department of Transportation) com resultados muito promissores. Em seus relatórios sobre a tecnologia, o USDOT estima que sistemas de comunicação V2V baseados em DSRC podem evitar cerca de 40% das colisões em interseções e mais de 82% dos acidentes envolvendo motoristas sóbrios nos EUA (descartando-se as colisões envolvendo motoristas alcoolizados ou sob efeito de drogas, por exemplo), potencialmente salvando milhares de vidas e bilhões de dólares (WU, SUBRAMANIAN, *et al.*, 2013). Entretanto, os relatórios ainda apontam o impacto da tecnologia em um ambiente apenas com veículos autônomos.

Para um veículo autônomo, que em geral é equipado com diversos sistemas de percepção do ambiente, a rede de comunicação veicular representa apenas mais uma fonte de informações. Ao lado de sensores on-board como lidar, radar e câmeras óticas, tal sistema de comunicação provê dados situacionais utilizados na unidade de controle para tomada de decisão. No entanto, a comunicação se distingue dos demais, não só pelo seu modo de operação, ao prover informações obtidas de forma colaborativa, mas também por prover dados que os demais sensores não são capazes de fornecer.

Figura 6 - Detecção de obstáculos por radares e câmera

Fonte: (HARDING, POWELL, *et al.*, 2014)

Uma das grandes vantagens do sistema de comunicação é sua capacidade de detectar obstáculos ocultos por outros. A figura 6 ilustra o campo de visão obtido com a utilização de um radar de longo alcance na parte frontal do veículo e radares de curto alcance em suas laterais (áreas azuis), além de uma câmera monocromática (área branca). Por sua vez, o sistema de comunicação pode receber as mensagens de todos os veículos próximos (que também possuam o sistema de comunicação) em um ângulo de 360°. Isso possibilita o aumento da capacidade de detecção de situações possivelmente perigosas para o veículo. A figura 7 ilustra esse mesmo cenário ao se aplicar um sistema de comunicação.

Figura 7 - Comunicação veicular

Fonte: (HARDING, POWELL, *et al.*, 2014)

Entretanto, alguns aspectos do sistema de comunicação, e de sistemas associados, podem degradar seu desempenho. Apenas os veículos equipados com o sistema de comunicação podem trocar mensagens. Portanto, veículos que não tem suporte ao sistema de comunicação não são identificados, e consequentemente, não são considerados pelas aplicações ITS baseadas em comunicação. Para a identificação desses veículos o veículo autônomo necessita utilizar os sensores on-board. Sobre esse tema, o NHTSA apresenta um estudo de como é a estimativa da absorção da tecnologia DSRC/WAVE no mercado (HARDING, POWELL, *et al.*, 2014). Segundo seu relatório, a entidade pretendia exigir que todos os veículos produzidos a partir de

2020, em território norte-americano, já fossem fabricados com o sistema de comunicação. No entanto, por decisões políticas, o planejamento de iniciar a exigência da adoção dessa tecnologia em 2020 não foi cumprido (ESTRADA, 2017). Já para os veículos que foram fabricados sem a tecnologia, o NHTSA planeja a criação de dispositivos que podem ser instalados e integrarem o veículo ao sistema de comunicação de forma a gerar alertas para os motoristas (os denominados *Aftermarket Devices*).

Outra questão que degrada a disponibilidade da comunicação V2X está associada à sua dependência de um sistema de posicionamento, como o GPS. A indisponibilidade do GPS, que é comum de ocorrer em cenários como os denominados “cânions urbanos”, túneis e sob espessa folhagem, degrada diretamente o desempenho do sistema V2X pelo fato da posição do veículo ser um dado de grande relevância para grande parte das aplicações ITS (HOFMANN-WELLENHOFHERBERT, LICHTENEGGER e WASLE, 2008). De acordo com resultados de testes realizados pelo projeto Crash Avoidance Metrics Partnership (CAMP) do DOT interrupções de posicionamento com duração inferior a 1 segundo não afetam significativamente as aplicações ITS de segurança (AHMED-ZAID, KRISHNAN, *et al.*, 2014). No entanto, uma indisponibilidade mais prolongada, entre 2 e 5 segundos, pode comprometer tais aplicações (HARDING, POWELL, *et al.*, 2014).

Além da disponibilidade, a acurácia e precisão do sistema de posicionamento também podem degradar o desempenho das aplicações ITS. Cada aplicação requer um determinado grau de exatidão da posição informada. Algumas aplicações como a Lane Change Warning (aplicação que evita colisão lateral ao realizar a troca de faixa de trânsito), podem requerer acurácia e precisão na ordem de centímetros.

Outro fator importante para o sistema de comunicação veicular é sua escalabilidade. Uma vez que o sistema seja amplamente difundido, haverá situações onde um considerável número de veículos próximos uns dos outros (como, por exemplo, em um engarrafamento) devem estar transmitindo mensagens pelo sistema de comunicação. Em tais cenários, é importante que a grande quantidade de mensagens trocadas não comprometa o desempenho do sistema de comunicação e, conseqüentemente, não afete as aplicações de segurança que dependem dele. A principal estratégia elaborada para minimizar o impacto desse cenário sobre a comunicação é baseada na adaptação da frequência de envio de mensagens baseada

em medições realizadas no próprio veículo ou em mensagens controle que indiquem altas taxas de recepção (mensagens com measurement reports) enviadas pelos veículos na proximidade do emissor. Além da frequência de envio o veículo também pode reduzir a potência de transmissão da mensagem enviada com o intuito de diminuir seu raio de alcance. A grande dificuldade de estimar a saturação do sistema de comunicação está em definir a quantidade de veículos que devem estar dentro do raio de comunicação de um veículo nessas condições. Testes com simuladores, realizados pela NHTSA, demonstraram que uma quantidade de 200 veículos transmitindo BSMs em uma taxa de 10 Hz através do DSRC não satura o sistema de comunicação a ponto de degradar uma aplicação baseada em comunicação. Entretanto, estudos da mesma agência apontam que, dependendo da configuração das vias, disposição e tamanho dos veículos, um único veículo pode conter até 800 outros veículos dentro de seu raio de comunicação (HARDING, POWELL, *et al.*, 2014). Portanto, estudos mais detalhados sobre o tema devem ser elaborados a fim de estimar a capacidade do sistema de comunicação em situações com saturação de transmissão e seu impacto nas aplicações de segurança.

Com relação à propagação do sinal DSRC no meio também existem fatores que podem degradar a comunicação e, conseqüentemente, afetar as aplicações ITS baseadas em comunicação. Os principais deles são o bloqueio e a reflexão do sinal emitido.

Um fator que afeta o sistema é a atenuação ou mesmo o bloqueio do sinal DSRC pelos próprios veículos. As ondas do sinal DSRC em 5.9 GHz ter certa facilidade em serem bloqueadas por corpos rígidos (LEBLANC e BELZOWSKI, 2012). Em ambiente veicular, isso ocorre principalmente com veículos grandes, como caminhões, carretas, ônibus e trailers, em cenários como o apresentado pela figura 8. A obstrução do sinal pode fazer com que os veículos não se comuniquem e pode trazer riscos para ambos.

Figura 8 - Cenário onde a carreta do veículo B bloqueia a comunicação entre os veículos A e C

Fonte: Leblanc (LEBLANC e BELZOWSKI, 2012)

Outro fator que pode afetar o sinal DSRC é a sua reflexão também pelos veículos de grande escala (LEBLANC e BELZOWSKI, 2012). Mesmo que essa reflexão do sinal possa contornar o problema do bloqueio, o sinal refletido aumenta o delay da comunicação e a onda refletida sofre uma inversão de fase que pode trazer dificuldades para o receptor interpretar o sinal recebido.

A nível de aplicação, os fatores que afetam a propagação do sinal são identificados como aumento do delay e perda de comunicação. Esse delay afeta diretamente a tomada de decisão por parte do veículo receptor dessas mensagens, afetando diretamente sua segurança.

Esta pesquisa aborda fatores que podem afetar diretamente o sistema de comunicação DSRC com o intuito de estabelecer requisitos mínimos que o sistema de comunicação deve garantir para o funcionamento seguro das aplicações ITS de segurança baseadas em comunicação. Alguns outros aspectos também relacionados à segurança do sistema de comunicação veicular são abordados pelo artigo “A preliminary analysis of impacts of vehicular ad hoc networks on traffic safety” publicado na European Safety and Reliability Conference (ESREL) em 2017 pelo autor deste trabalho em colaboração com outros pesquisadores do Grupo de Análise de Segurança (GAS) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e da Ericsson Research (SILVA, CAMARGO, *et al.*, 2017).

2.4 Ferramentas de Simulação

O processo de escolha da ferramenta de simulação adotada para a elaboração dos modelos se baseou nos trabalhos da literatura. Foram base dessa etapa os trabalhos que apresentam uma análise comparativa entre as ferramentas disponíveis tanto para simulação de rede veicular quanto para tráfego de veículos. Os trabalhos de Harri et al. (HARRI, FILALI e BONNET, 2009) e Cheng et al. (CHENG, CHENG, *et al.*, 2015) categorizaram e avaliaram os simuladores de comunicação veicular. A tabela 1 é uma adaptação da apresentada pelos autores que sumariza algumas características das principais ferramentas de simulação de comunicação veicular.

Tabela 1 – Simuladores de Rede

Simulador	OPNET	QualNet	Ns-2	Ns-3	J-Sim	OMNet++	SWANS
GUI IDE	Sim	Sim	Não	Não	Não	Sim	Não
Código fonte disponível	Apenas para módulos de simulação	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Tecnologias wireless suportadas oficialmente	Wi-Fi, UMTS, LTE, WiMAX, Zigbee e Satélite	Wi-Fi, GSM, UMTS, LTE, WiMAX e Zigbee	Wi-Fi, Celular e Satélite	Wi-Fi, LTE e WiMAX	Wi-Fi	Nenhum (somente por modelos externos)	Wi-Fi (IEEE 802.11b)
Inclui modelo de simulação de tráfego	Não	Sim	Não	Não	Não	Não	Não

Fonte: Adaptado de Cheng (**CHENG, CHENG, et al., 2015**)

Da mesma forma, os simuladores de tráfego também foram avaliados. Estes são classificados em duas principais categorias: Os simuladores macroscópicos e microscópicos (KOTUSEVSKI e HAWICK, 2009). As simulações macroscópicas focam no comportamento da rede veicular de modo mais amplo. Esse tipo de simulador, utilizando principalmente técnicas estatísticas e dados históricos, modela o fluxo de veículos e seu comportamento. Esses simuladores são destinados principalmente à análise de comportamento dos fluxos e para tomada de decisão estratégica por parte de órgãos de gestão de tráfego. Já os simuladores microscópicos, aplicando técnicas de sistemas multiagentes ou de sistema de partículas, por exemplo, focam nos elementos do ambiente de tráfego. Esses simuladores se destinam principalmente a estudos onde o comportamento de cada veículo é relevante. Portanto, um simulador microscópico foi selecionado uma vez que os objetivos da pesquisa estão associados ao comportamento e controle de cada veículo. A tabela 2 apresenta as principais características dos simuladores de tráfego utilizados atualmente.

Tabela 2 – Simuladores de tráfego

Simulador	DynaMIT	SUMO	Quadstone Paramics	VISSIM
GUI IDE	Sim	Sim	Sim	Sim
Código fonte aberto	-	Sim	Não	Não
Modo de simulação	Tempo real	Tempo real/Tempo acelerado	Tempo real	Tempo acelerado
Permite controle dinâmico da simulação	Sim	Sim	-	Sim
Principais características	Simulador macroscópico, mas permite simulação microscópica	Simulador microscópico	Simulador macroscópico e microscópico	Simulador microscópico

Fonte: Próprio autor

Após a avaliação e classificação das ferramentas de simulação o trabalho de Cheng (CHENG, CHENG, *et al.*, 2015) indica a utilização do modelo Vehicles in Network Simulation (Veins) que permite uma integração com o modelo de mobilidade Simulation of Urban Mobility (SUMO). Segundo os autores, essa ferramenta ofereceu resultados precisos em suas simulações de rede veicular.

O Veins é um framework de simulação de rede veicular composto por um conjunto de modelos das camadas de rede que possibilita avaliar as características próprias dessas redes. Ele é desenvolvido com base no simulador de redes OMNeT++. O OMNeT++ é um simulador de redes baseado em eventos que apresenta uma grande quantidade de modelos de rede desenvolvida por sua comunidade. O SUMO é um simulador microscópico que modela o ambiente veicular possibilitando a simulação do comportamento de veículos, transporte público, pedestres, topologia e estrutura de vias (semáforos, sentidos de condução, configuração de vias, entre outros) (KRAJZEWICZ, ERDMANN, *et al.*, 2012). O SUMO dispõe de uma biblioteca, denominada Traffic Control Interface (TraCI), que possibilita o controle da simulação em tempo de execução. Essa biblioteca é incorporada pelo Veins e permite a implementação de uma camada de mobilidade na simulação da rede veicular, conforme é apresentado na figura 9.

Os módulos do Veins são implementações detalhadas que cobrem vários aspectos da comunicação veicular. Sua implementação segue as especificações das camadas de rede e fornece um conjunto básico de mensagens como a Wave Service Message (WSM) e a Basic Safety Message (BSM) (ECKHOFF, SOMMER e DRESSLER, 2012).

Figura 9 – Arquitetura OMNeT++/Veins/SUMO

Fonte: Documentação do Veins (SOMMER, 2019)

O Veins é um modelo de rede veicular que implementa uma rede DSRC. Existe uma versão do Veins que implementa a rede LTE D2D que também foi avaliada. No entanto, ela não foi selecionada pelo fato de não ser otimizada ao apresentar demasiadas etapas de processamento interno que aumentavam consideravelmente o tempo de execução da simulação. O modelo também tem alguns problemas de codificação em aberto e encontrava-se no momento da análise descontinuado pela comunidade de desenvolvedores. Este foi um dos motivadores para o desenvolvimento do modelo baseado em uma rede DSRC e não em LTE D2D. Por outro lado, o Veins apresenta uma implementação bem mais madura, com comunidade de desenvolvedores ativa e participativa na solução dos problemas detectados.

Esta pesquisa adotou a combinação de ferramentas de simulação OMNeT++/Veins/SUMO em função dos motivos técnicos listados acima e também em função da prévia experiência do grupo de pesquisa com a ferramenta (MOLINA, GONZALEZ, *et al.*, 2017). O Grupo de Análise de Segurança (GAS) já utiliza essa ferramenta para simulações veiculares e apresenta bons resultados (VISMARI, MOLINA, *et al.*, 2018).

3 REQUISITOS E LIMITAÇÕES DO SISTEMA DE SIMULAÇÃO

Diante das características do sistema de comunicação veicular tratadas pela literatura, a pesquisa deve desenvolver um modelo de simulação controlada da rede de comunicação e do ambiente veicular. Para realizar tal modelagem, a ferramenta computacional desenvolvida deve apresentar certas características essenciais para os objetivos da pesquisa. Tais características são comuns a ambos os modelos de simulação propostos.

- Capacidade de simular a rede veicular e o ambiente veicular e que ambas consigam interagir da forma mais real possível. É necessário que a simulação da rede veicular obtenha os dados advindos da simulação veicular e interaja com ela (a propagação do sinal, por exemplo, pode sofrer atenuação de prédios e outros obstáculos presentes ao entorno da via). Da mesma forma, os veículos simulados devem interagir com a simulação de forma a responder aos comandos gerados pela aplicação baseada em comunicação. Segundo Cheng (CHENG, CHENG, *et al.*, 2015), os modelos de mobilidade de veículos são utilizados para produzir as rotas de movimentação dos nós utilizados pelo simulador de rede. Portanto, uma das principais características que a ferramenta de simulação deve apresentar é a integração entre essas duas simulações, ou seja, da rede e do ambiente veicular.

- Fácil inclusão de novas aplicações que utilizam a comunicação veicular para cumprir determinada tarefa. Por exemplo, para o cenário de controle de interseção é necessário que a aplicação de controle seja implementada na RSU. Adicionalmente, os veículos autônomos simulados também devem estar preparados para receber esses comandos de controle, através do sistema de comunicação, e aplicá-los nos veículos. Portanto, a ferramenta de simulação dos veículos autônomos deve permitir que haja a inclusão de uma aplicação no seu sistema de controle que permita a recepção e a execução desses comandos de controle. Essa aplicação, presente nos veículos autônomos simulados, também deve ser responsável pelo envio das mensagens Basic Safety Message (BSM).

- Escalabilidade de forma a suportar um elevado número de veículos autônomos sendo simulados em paralelo e utilizando o sistema de comunicação para troca de mensagens BSM e comandos de controle. Tal característica se mostra importante pois

permite a avaliação da capacidade do sistema de comunicação, onde há necessidade de medir a saturação do canal de comunicação, por exemplo.

- A acurácia e precisão das métricas geradas por essa ferramenta também são relevantes para os resultados dessa pesquisa. A partir dos dados gerados é que analisa o comportamento do sistema como um todo. Portanto, as métricas precisam ser mais próximas o possível de um cenário real.

- Na simulação do ambiente veicular, a modelagem do veículo deve incluir as características físicas de um veículo real. Suas características de mobilidade devem ser reproduzidas a fim de prover resultados mais próximos da realidade.

- A simulação de um sistema de posicionamento para os veículos também deve estar presente uma vez que a posição dos veículos é uma informação essencial para a tomada de decisão por parte da aplicação de controle de interseção. Portanto, um sistema de posicionamento Global Navigation Satellite System (GNSS), como por exemplo o Global Positioning System (GPS), deve ser simulado. Uma característica desejável na simulação desse sistema de posicionamento é a existência de algum grau de imprecisão na posição gerada, característica existente nos sistemas reais (HOFMANN-WELLENHOFHERBERT, LICHTENEGGER e WASLE, 2008). Essa característica já está presente no modelo de tráfego de veículos definido para ambos os modelos desenvolvidos (Sumo).

- A ferramenta de simulação a ser adotada deve simular os comportamentos de um veículo autônomo. Tal característica influencia diretamente o desempenho do sistema e sua capacidade e de prover *collision avoidance*.

- No ambiente de simulação de redes, a fidelidade do modelo da pilha de protocolos com sua especificação é essencial. No caso do sistema DSRC/WAVE, a ferramenta deve simular as camadas Physical Layer (PHY) e Medium Access Control (MAC) (definidas pela IEEE802.11p), Logical Link Control (LLC) (definida pela IEEE802.3), WAVE Short Message Protocol (WSMP) (definida pela IEEE1609.3), Internet Protocol (IP), Transmission Control Protocol (TCP), User Datagram Protocol (UDP) e aplicação de acordo com as especificações. Além disso, a simulação da propagação física do sinal, como sua atenuação no meio, é importante para os cálculos, por exemplo, de perda de pacotes.

- A ferramenta deve armazenar os resultados da execução das simulações para futura análise. Dados relevantes da simulação do ambiente veicular e do sistema de

comunicação devem ser coletados. Os dados relacionados à ocorrência de colisões entre os veículos (como quantidade de colisões, posição e velocidade dos veículos envolvidos em cada colisão) e métricas de rede são relevantes para a análise posterior.

Por se tratar de uma análise da rede de telecomunicação, o veículo simulado tem como fonte de informações da via apenas as mensagens recebidas de outros veículos. Portanto, o veículo simulado não apresenta quaisquer outros dispositivos de detecção de obstáculos, como radar, câmeras óticas ou lidar.

A pesquisa não abrange medidas de contingência ou de mitigação. Neste contexto, uma medida de mitigação das consequências de uma colisão pode ser exemplificada pela atuação dos sistemas de segurança passiva do veículo, como air bag, cinto de segurança, sistemas de absorção de impacto e regiões de deformação programada, dentre outros. Da mesma forma, as medidas de contingência de colisão abrangem os sistemas de segurança ativa, como os freios ABS (Anti-lock Braking System), por exemplo.

Esta pesquisa não considera falhas nos veículos que os impeçam de executar os comandos recebidos da RSU, no modelo de cruzamento de vias, ou do sistema de controle do próprio veículo, no modelo de ultrapassagens. Falhas no sistema de frenagem ou aceleração, por exemplo, podem levar o veículo a um estado inseguro pois estes comandos são gerados justamente para evitar colisões e podem não ser executados adequadamente. São falhas importantes no contexto de segurança do veículo, porém não são tratadas nesta pesquisa pelo fato desta ter foco nas falhas do sistema de comunicação.

Da mesma forma, também não são considerados eventuais obstáculo na via que possam impedir o trânsito dos veículos ou comprometer sua capacidade de executar os comandos de controle. A presença desses obstáculos só é identificada pelos sensores on-board do veículo autônomo. Como os modelos propostos não simulam esses sensores, a pesquisa também não os considera. No modelo de cruzamentos, por exemplo, a detecção desses obstáculos faria o sistema de controle do veículo autônomo estipular alguma manobra evasiva, a partir de dados de sensores on-board, que entraria em conflito com o comando enviado pela RSU (visto que esta não estaria ciente da presença do obstáculo). Por mais relevante que possam ser no contexto de

prevenção de colisões, os conflitos de comandos de controle fogem do escopo desta pesquisa.

No modelo de interseção de vias, o cenário adotado também não prevê manobras dos veículos na interseção. Todos os veículos cruzam a interseção sem fazer conversão. As vias elaboradas para este estudo de caso são vias simples com apenas um sentido de tráfego. Portanto, se algum veículo fizesse uma conversão estaria em sentido proibido na via de destino e de encontro com os demais veículos que trafegam em direção à interseção. Essa configuração foi adotada para focar a pesquisa num objetivo específico. Para a finalidade de avaliação do modelo de controle a existência de manobras na IR é relevante. No entanto, como o objetivo desta pesquisa é avaliar a comunicação veicular um cenário simplificado foi adotado.

Ambos os modelos implementam um mecanismo de atualização do mapa virtual baseado em estimativas. No modelo de interseção a RSU mantém um mapa virtual que é atualizado a cada BSM recebida dos veículos. É com base neste mapa que a RSU aloca temporalmente a Região de Interseção para cada veículo. Este mapa também é utilizado para identificar possíveis conflitos de rota que possam gerar colisão entre veículos. Já no modelo de ultrapassagens o Mapa Virtual está presente em cada veículo que o utiliza para a tomada de decisão sobre a manobra de ultrapassar algum veículo lento à sua frente. O mecanismo de atualização atualiza este mapa a cada passo de simulação estimando a velocidade e a posição dos veículos no mapa com base nas informações da última BSM deles recebida. Este mecanismo tem o objetivo de manter sempre o mapa atualizado para a tomada de decisão, mesmo que este estado atualizado seja obtido através de estimativas.

4 MODELO COMPUTACIONAL PARA SIMULAÇÃO DE INTERSEÇÃO DE VIAS

A interseção de vias é um cenário de interesse para o desenvolvimento de aplicações ITS baseadas em comunicação devido às altas taxas de acidentes apresentadas por esse trecho de vias. A utilização de comunicação V2I e V2V possibilita o controle da passagem de veículos e dispensa a utilização dos tradicionais semáforos de trânsito. A comunicação veicular no controle de interseções de via pode trazer melhorias na mobilidade das vias, redução no consumo de combustível e emissão de poluentes (LI, CHITTURI, *et al.*, 2015). Ela também possibilita uma melhor compreensão da utilização da interseção de vias ao tratar dados dos veículos que por esse trecho trafegam. Dados como velocidade, posição e rota podem ser utilizados como fonte para um sistema que controle esses veículos com a finalidade de aumentar a fluidez do trânsito. Esse sistema de controle também pode evitar que os veículos parem ou acelerem abruptamente, evitando assim o aumento no consumo de combustíveis e de emissão de poluentes.

Outra questão que a aplicação da comunicação veicular pode tratar é a redução na ocorrência de colisões entre veículos nesses locais. Essa pesquisa aplica um sistema de controle de interseção baseado em comunicação com a finalidade de avaliar os requisitos necessários para tal aplicação garantir a segurança dos veículos.

Existem duas principais estratégias de coordenação de veículos autônomos em interseções de via considerando um sistema de comunicação veicular: centralizada e descentralizada. Em uma estratégia centralizada todo o controle de uma determinada interseção é realizado por um elemento de via (RSU). Essa unidade recebe os dados situacionais dos veículos, estabelece a sequência de utilização da interseção e envia instruções para cada um dos veículos dentro de sua área de controle. Já em uma estratégia descentralizada os próprios veículos que se aproximam da interseção por diferentes vias se comunicam e negociam a sequência de passagem.

O sistema de controle de interseção Autonomous Control of Urban Traffic (ACUTA) proposto por Li (LI, CHITTURI, *et al.*, 2013) implementa uma estratégia centralizada baseada em reservas. Este tipo de sistema de controle demonstrou boa performance operacional maximizando a capacidade da interseção, reduzindo o número de paradas e o delay sofrido pelos veículos. Também se mostrou ser eficiente para reduzir a emissão de poluentes e consumo de energia nesse cenário (LI, CHITTURI,

et al., 2015). O ACUTA é implementado na RSU e recebe informações dos veículos próximos. Nessa abordagem centralizada os veículos apenas se comunicam com a RSU. Ao entrarem na área de comunicação da RSU os veículos enviam uma solicitação de reserva contendo, entre outras informações, sua velocidade, posição atual e a intenção de manobra a ser realizada na interseção. No cenário adotado as manobras possíveis são seguir em frente, virar para direita ou esquerda. Com base nessas informações o ACUTA determina a sequência de passagem de todos os veículos aplicando o algoritmo "First come, first served" (FCFS) (DRESNER e STONE, 2008). Para isso, o ACUTA divide a região de interseção em uma malha de $n \times n$ sub-regiões, onde n determina a granularidade da malha, como mostra a figura 10 onde a região de interseção é dividida nas sub-regiões representadas pelos quadrados vermelhos. Em uma granularidade igual a 1 toda a área de interseção é alocada por intervalo de tempo e apenas um veículo pode ocupá-la por vez (nesse caso o ACUTA é denominado Single-Tile ACUTA). Em uma granularidade maior que um o ACUTA é denominado Multi-Tile ACUTA. Pelos resultados apresentados, o ACUTA foi adotado como base para o sistema de controle de interseção proposto nesta pesquisa. Neste caso, utilizou-se a abordagem Single-Tile ACUTA pois o cenário deste trabalho apresenta apenas uma via em cada sentido do cruzamento.

Figura 10 - Região interseção exibindo sua granularidade e exemplo de possíveis decisões de rota do veículo

Fonte: Li (LI, CHITTURI e NOYCE, 2013)

Outro trabalho que forneceu base para esta pesquisa foi o de Miculescu e Karaman (MICULESCU e KARAMAN, 2020). Este trabalho apresenta um algoritmo de controle de interseção que os autores garantem ser livre de colisões. Trata-se de um algoritmo

de controle centralizado aplicado ao cenário de cruzamento de duas vias apresentado na figura 11. Neste cenário os veículos são inseridos nas vias em instantes de tempo determinados através de um processo estocástico proposto pelos autores.

Figura 11 - Cenário de interseção de vias

Fonte: (MICULESCU e KARAMAN, 2020)

As maiores contribuições apresentadas por Miculescu e Karaman foram a definição do cenário e a estratégia de controle a ser adotada (controle centralizado). O algoritmo de controle aqui implementado não se baseia na estratégia apresentada por Miculescu e Karaman apesar de esta ter garantias de segurança de acordo com as premissas apresentadas pelos autores com relação ao sistema de comunicação. No sistema proposto pelos autores a comunicação é utilizada apenas para o envio do posicionamento dos veículos para a RSU e de um comando de controle para cada veículo quando este entra na região de controle da interseção. A RSU identifica esse evento através da BSM recebida dos veículos. Ao incluir o novo veículo na região de controle a RSU já aloca a região de interseção para aquele veículo durante o intervalo de tempo necessário para sua travessia e define todos os passos necessários para que aquele veículo atinja a região de interseção no instante para ele alocado (considerando o tráfego que o veículo terá até atingir a região de interseção). Essa rota é enviada para o veículo que a segue até cruzar a interseção. Ou seja, o modelo de Miculescu e Karaman não considera nenhuma perturbação. O sistema de comunicação não tem degradação e os veículos seguem perfeitamente a rota proposta sem nenhuma perturbação. Utilizar um modelo com estas características inviabiliza o estudo de impacto de degradação do sistema de comunicação pois

qualquer alteração no sistema de comunicação será um desvio do conceito prévio do sistema. Para que a comunicação seja explorada de forma que sua degradação influencie a ocorrência de colisões um sistema de controle com modo de atuação mais dinâmico é necessário.

Outra abordagem de tratamento do problema de cruzamento de vias é a utilização de algoritmos genéticos. O trabalho de Lu e Kim (LU e KIM, 2017) aplica esse tipo de algoritmos em sua proposta de sistema denominado DTOT-based Intersection Control Algorithm (DICA). O DICA objetiva controlar a interseção considerando a presença de veículos de emergência e busca diminuir o tempo de tráfego desses veículos pela região de controle do cruzamento. Os resultados apresentam uma redução nesse tempo de tráfego sem degradar significativamente o desempenho dos demais veículos.

O sistema de controle de interseção aqui proposto implementa uma abordagem centralizada. A granularidade adotada é igual a 1 (Single-Tile) devido à configuração do cenário adotado de duas vias de uma única faixa de rodagem. Portanto, o sistema de controle permite apenas um veículo por vez na região de interseção.

O cenário é semelhante ao apresentado pelo trabalho de Miculescu e Karaman (MICULESCU e KARAMAN, 2020): Duas vias ortogonais que se cruzam em uma extremidade (semelhante à figura 12). Em sua outra extremidade os veículos são inseridos em direção à interseção. A inclusão de veículos nessas vias foi configurada de maneira periódica. Com isso, as vias recebem novos veículos em intervalos regulares de tempo. No entanto, uma premissa importante foi adotada com relação à separação mínima existente na inclusão desses veículos: Eles devem respeitar uma separação mínima de um veículo de distância entre eles. Isso ocorre para que o controle da interseção consiga sempre incluir a passagem de outro veículo, que trafega pela outra via, entre dois veículos de mesma via. Essa premissa é respeitada pelo modelo ao incluir os veículos nas extremidades das vias e durante seu trajeto até a região de controle da RSU. Desde sua inclusão na via os veículos são configurados para manterem uma taxa constante de envio de mensagens BSM. O raio de comunicação dos veículos é maior que a Control Region (CR), portanto a RSU começa a receber mensagens de um determinado veículo antes que ele pertença à CR. A CR delimita a região a partir da interseção na qual os veículos passam a receber comandos de controle da RSU. Já a Intersection Region (IR) representa a porção da

via onde as vias se cruzam. A figura 12 apresenta esses trechos em uma representação simplificada do cenário adotado.

Figura 12 – Regiões da interseção de vias controlada pela RSU

Fonte: Próprio autor

Uma vez que o veículo envia uma BSM indicando seu posicionamento dentro da CR a RSU o insere em seu mapa situacional e já estabelece uma sequência de cruzamento pela IR considerando esse novo veículo. O mapa situacional presente na RSU contém todas as informações recebidas dos veículos relevantes para a tomada de decisão. Informações de identificação do veículo, em qual via ele trafega, sua posição na via e velocidade são alguns dos dados que caracterizam cada veículo do mapa. Com base nesses dados, a RSU estabelece uma velocidade alvo para esse novo veículo de modo que ele alcance o início da IR no exato momento que começa o intervalo de tempo alocado para ele ocupar a IR. A velocidade alvo é enviada em uma mensagem Wave Service Advertisement (WSA) para o veículo recentemente adicionado. Ao receber tal mensagem o veículo aplica essa velocidade alvo realizando uma aceleração ou desaceleração. Como os veículos adotados são providos apenas de um sistema de comunicação, ao entrar na CR da RSU e receber a WSA com a velocidade alvo o veículo passa a ser controlado única e exclusivamente pela RSU.

Portanto, foge do escopo dessa pesquisa a aplicação de outros tipos de fontes de informação para o veículo autônomo, como sensores óticos por exemplo, bem como possíveis incertezas de decisões de controle geradas por informações conflitantes de fontes distintas.

Mesmo após a recepção da WSA o veículo continua enviando seus dados situacionais através da mensagem BSM. A RSU, por sua vez, utiliza essas mensagens para atualizar seu mapa situacional e identificar possíveis colisões entre os veículos dentro da CR ou IR. Quando uma possível colisão é identificada (seja na IR entre veículos de vias diferentes ou em uma das CR entre veículos que trafegam na mesma via) a RSU envia novos comandos de controle em uma mensagem WSA para um dos veículos. A resolução dessa possível colisão se dá alterando a velocidade alvo de um dos veículos de forma que, quando aplicada, a colisão não ocorra. Dada a importância dos dados de cada veículo no mapa virtual, a RSU, a cada passo de simulação, estima e atualiza o posicionamento e velocidade atual de todos os veículos. Isto visa tornar o mapa mais próximo da realidade possível e tornar a tomada de decisão por parte da RSU mais tolerante a degradação do sistema de comunicação.

Na alteração de velocidade definida pode ocorrer tanto uma aceleração quanto uma desaceleração do veículo em conflito que foi selecionado para alterar sua velocidade. Uma aceleração ocorre apenas quando o veículo selecionado não tem outro veículo na sua frente dentro do mapa situacional da RSU. Nessa situação, o veículo irá acelerar para a velocidade máxima permitida dentro da CR. Quando o veículo selecionado tem outro veículo a sua frente, a decisão tomada sempre é aplicar uma desaceleração. Nesse caso, essa desaceleração é aplicada também em todos os veículos que estão localizados na mesma via e após o veículo alvo da desaceleração, caracterizando a chamada propagação de desaceleração. Neste caso, o comando de desaceleração enviado pela RSU via DSRC contém a velocidade alvo, o identificador do veículo alvo, a flag de propagação de desaceleração ativa e uma lista de identificadores de veículos alvo da propagação de desaceleração. Portanto, cada veículo, ao receber uma mensagem de controle da RSU, checa não só se o identificador da mensagem é igual ao seu identificador e aplica a velocidade alvo em caso positivo. O veículo também verifica a flag de propagação de desaceleração. Caso ela esteja ativa, ele confere se o seu identificador consta na lista de propagação

de desaceleração. Se o veículo constar na lista de desaceleração, este também desacelera para a velocidade alvo.

Para a identificação dos conflitos o sistema de controle da interseção, presente na RSU, faz uso de dois timers calculados para cada veículo pertencente ao seu mapa. O timer T1 indica o instante de tempo em que o veículo deve estar com o para-choque dianteiro no início da região de interseção e o timer T2 indica o instante de tempo em que o veículo deve estar com o para-choque traseiro no fim da região de interseção. Logo, o intervalo de tempo entre T1 e T2 indica a duração da ocupação da interseção por determinado veículo. O sistema de controle de interseção identifica conflitos ao cruzar os timers de todos os veículos pertencentes ao mapa. Um conflito entre os veículos a e b (sendo estes veículos que trafegam em vias diferentes) é identificado quando ocorre interseção entre os timers desses dois veículos.

Se é identificado a possibilidade de ocorrência de uma colisão o sistema de controle realiza sua resolução. Para isso o algoritmo utiliza tanto critérios situacionais do mapa quanto a média aritmética simples entre os timers dos veículos envolvidos. O primeiro critério a ser aplicado é a disposição dos veículos no mapa virtual. O algoritmo verifica se algum dos veículos tem a frente livre, ou seja, se entre a posição atual do veículo e a interseção não há nenhum outro veículo. Se um dos dois veículos tem a frente livre então este veículo será selecionado para realizar um aumento de velocidade que evite a colisão. Nesse caso o veículo, que irá realizar a aceleração recebe a velocidade máxima da via. Se ambos os veículos tiverem a frente livre o algoritmo seleciona o que estiver mais próximo da interseção para aplicar a velocidade máxima da via. Por outro lado, se ambos os veículos não estiverem com a frente livre então um deles deve desacelerar para evitar a colisão. Para isso o algoritmo calcula a média simples entre os timers T1 e T2. A média indica qual dos dois veículos se encontra mais distante da interseção, dada a velocidade atual de ambos. O veículo mais distante irá receber a desaceleração. Uma vez identificado esse veículo, o algoritmo calcula qual será a nova velocidade a ser enviada através do comando de controle e aplicada pelo veículo afim de evitar a colisão identificada. Considerando-se A o veículo que irá receber a desaceleração e B o veículo com o qual foi identificada a possível colisão, a velocidade final de A é calculada pela equação abaixo:

$$v = \frac{dA}{tB + e}$$

Onde:

v = velocidade a ser aplicada pelo veículo que irá desacelerar;

dA = distância do para-choques dianteiro do veículo A para o início da interseção;

tB = instante em que o para-choques traseiro do veículo B deixa a IR;

e = constante de segurança (adotado empiricamente um valor de 0.35s com base em execuções do modelo para calibração deste parâmetro tendo em vista a configuração do modelo).

Como todos os veículos dentro da simulação são controlados pela RSU, esta deve, ao desacelerar algum veículo, tratar os demais veículos da mesma via. A finalidade é evitar a colisão entre o veículo que receberá a desaceleração e algum outro possível veículo que trafegue atrás dele e desenvolva velocidade maior. Para evitar esse tipo de colisão a RSU propaga essa nova velocidade para todos os veículos que porventura estejam localizados após o veículo a ser desacelerado. Para isso, a mensagem WSA enviada contém, além da nova velocidade a ser aplicada e o identificador do veículo alvo, uma lista com os identificadores de todos os veículos que devem aplicar essa velocidade por estarem localizados após o veículo alvo.

Uma vez calculada a velocidade alvo para resolução do conflito e a identificação do(s) veículo(s) que receberá(ão) essa nova velocidade a ser aplicada, a RSU utiliza o sistema de comunicação para enviá-la. Nesse caso a aplicação de controle utiliza a ferramenta de simulação de rede DSRC para envio da WSA. A ferramenta simula toda a pilha de protocolos no emissor e nos receptores, bem como a propagação do sinal no meio.

Os veículos, ao receberem a mensagem, também simulam toda a pilha de protocolos e encaminham a WSA para a aplicação de controle do veículo. Esta altera a velocidade atual do veículo para o valor recebido aplicando sempre a aceleração/desaceleração máxima do veículo, por se tratar de uma aceleração/desaceleração de emergência. Por se tratar de um veículo autônomo, o tempo de percepção e reação (que, em geral, é relevante quando se trata de um motorista humano) é mínimo e, portanto, desconsiderado (LI, CHEN, *et al.*, 2020). Porém, toda a dinâmica do veículo, como seu movimento inercial, é considerada e implementada pelo Sumo.

Figura 13 - Simulação de tráfego no SUMO (à esquerda) e simulação de rede veicular no OMNeT++ (à direita)

Fonte: Próprio autor

A figura 13 apresenta o ambiente gráfico da ferramenta de simulação. À esquerda está a interface gráfica da ferramenta SUMO executando a simulação do ambiente veicular. A imagem apresenta detalhes das vias próximas à IR com os veículos trafegando em direção a ela. Do lado direito da imagem encontra-se o ambiente gráfico da simulação da rede veicular no OMNeT++ onde os mesmos veículos presentes na simulação do SUMO são representados trocando mensagens via DSRC. A imagem apresenta a transmissão de uma mensagem por um veículo em forma de broadcast para todos os demais (inclusive a RSU, que também é apresentada).

5 MODELO COMPUTACIONAL PARA SIMULAÇÃO DE CONTROLE DE ULTRAPASSAGENS

As rodovias com pista única de duplo sentido de rodagem, ou simplesmente rodovias de mão dupla, são um cenário que apresenta elevado número de colisões fatais (MOTRO, CHU, *et al.*, 2016). Nestes locais, grande parte das colisões ocorre durante a manobra de ultrapassagem e são causadas, principalmente, por erros humanos. Diante disso, a aplicação de sistemas de comunicação que deem suporte ao condutor (gerando alertas quando uma ultrapassagem insegura é identificada) ou ao sistema de controle de veículos autônomos (fazendo parte da tomada de decisão que avalia a segurança da realização da manobra) tem o potencial de reduzir consideravelmente a ocorrência dessas colisões (HARDING, POWELL, *et al.*, 2014).

Entretanto, a manobra de ultrapassagem em rodovias de mão dupla representa um grande desafio para o controle de veículos autônomos por sua alta complexidade. Um fator crucial para um veículo autônomo neste cenário é a aquisição de dados situacionais utilizados na tomada de decisão. Existe a necessidade de se antecipar ainda mais possíveis situações que possam causar qualquer tipo de colisão. Pois os veículos desenvolverem maiores velocidades nesse cenário se comparado a um ambiente urbano, por exemplo. Nesse aspecto, o sistema de comunicação apresenta vantagens se comparado aos sistemas de sensores e câmeras, principalmente por sua maior área de detecção de obstáculos (MOTRO, CHU, *et al.*, 2016).

A manobra de ultrapassagem é definida pela literatura como uma variação da manobra de troca de vias, ou lane change. A lane change é um tema de grande interesse científico. Entretanto, a ultrapassagem em rodovias de mão dupla é um dos temas menos estudados dentro da área de veículos autônomos. O trabalho de Motro (MOTRO, CHU, *et al.*, 2016) é um exemplo desses poucos estudos. Seu objetivo é avaliar a efetividade de um sistema de comunicação DSRC em modo V2V no cenário de rodovias de duas vias. Para isso, os autores analisaram parâmetros da cinemática veicular, características do DSRC e características de motoristas humanos. Neste trabalho também foi utilizando a ferramenta VEINS para a criação do modelo de simulação utilizado nos experimentos. Os autores simularam 18.000 manobras de ultrapassagem das quais 10.000 eram manobras que causariam colisão. Os resultados obtidos pelos autores mostram que em determinadas condições o sistema

DSRC apresenta raio de comunicação menor que a distância percorrida pelos veículos para realizar a manobra de ultrapassagem. Como conclusão os autores afirmam que, para esse cenário, a distância de comunicação tem maior influência na detecção de manobras que podem causar colisão do que outras características da rede, como erro de pacotes ou falhas momentâneas de comunicação, por exemplo. A literatura classifica a manobra de ultrapassagem em 4 tipos distintos (HEGEMAN, BROOKHUIS e HOOGENDOORN, 2005) que são ilustrados na figura 14:

- Normal, onde o veículo que faz a ultrapassagem reduz sua velocidade ao se aproximar do veículo lento e passa a segui-lo até que tenha condições seguras de realizar a manobra. Quando isso ocorre ele acelera, faz a troca de faixa e ultrapassa o veículo lento;
- Flying, onde o veículo que faz a ultrapassagem mantém a velocidade e inicia a ultrapassagem assim que se aproxima do veículo lento;
- Piggy backing, onde o veículo que faz a ultrapassagem realiza a manobra juntamente com outro veículo a frente que também está ultrapassando o veículo lento;
- 2+, onde o veículo que realiza a manobra ultrapassa dois ou mais veículos lentos em uma única manobra.

Fonte: Hegeman (HEGEMAN, BROOKHUIS e HOOGENDOORN, 2005)

O objetivo do modelo proposto se assemelha ao do trabalho de Motro, que avalia a efetividade do sistema DSRC em identificar manobras de ultrapassagem inseguras. Entretanto, o trabalho de Motro considera um condutor humano e os fatores a ele associados. Nesta pesquisa considera apenas veículos autônomos SAE nível 5 (SAE INTERNATIONAL, 2018). Para isso, o modelo apresenta uma pista onde trafegam apenas veículos desse tipo, que são equipados com sistema de comunicação e

sistema de controle. Este sistema de controle se baseia unicamente nas informações recebidas dos demais veículos para identificar o ambiente e tomar decisões de realizar as manobras de ultrapassagem. Neste cenário, a avaliação é realizada analisando como a cinemática veicular e os parâmetros de rede, que são diretamente controlados pelo ambiente de simulação, afetam a capacidade de identificação de manobras de ultrapassagem inseguras.

O modelo proposto apresenta uma pista única com duas vias de sentidos opostos, como apresenta a figura 15. Em uma das vias são inseridos veículos de dois tipos (veículos lentos, que apresentam velocidade máxima e aceleração menores, e veículos rápidos, com maior velocidade máxima e maior aceleração) e na via oposta trafegam apenas veículos rápidos. Entretanto, ambos os tipos de veículos simulados apresentam as mesmas demais características físicas, como as dimensões do veículo, por exemplo.

Figura 15 - Trecho de pista simulado na ferramenta Sumo

Fonte: Próprio autor

Por simular apenas um trecho de pista, o modelo apresenta uma região em cada via onde podem ocorrer colisões indetectáveis pelo sistema de comunicação no início da manobra: a extremidade final de cada via. O sistema de controle dos veículos que pretendem ultrapassar, antes de definir o início a manobra, deve avaliar o ambiente a fim de identificar qualquer obstáculo que possa colidir com o veículo durante a manobra. Quando a manobra ocorre nessas regiões da pista simulada, podem ocorrer situações onde o sistema de controle do veículo define a região da via oposta à frente do veículo como trecho livre (sem obstáculos) e, portanto, a ultrapassagem pode ser iniciada. Porém, durante a manobra, um novo veículo pode ser inserido na extremidade desta via oposta. Este novo veículo, portanto, pode ser inserido na simulação dentro da área de ultrapassagem do veículo que se encontra realizando a manobra. Nesta situação, muito possivelmente, ocorrerá uma colisão que é imprevisível ao veículo que está realizando a manobra no momento que este toma a decisão de realizar a ultrapassagem sobre o veículo lento a sua frente. Diante dessa característica do modelo proposto, que pode levar a colisões que não pertencem ao

escopo desta pesquisa, implantou-se nestes trechos de via regiões onde não é permitido realizar ultrapassagem, assim como ocorre atualmente em locais onde a visibilidade do trecho de pista à frente é insuficiente para permitir ultrapassagens. A figura 16 apresenta essas regiões no cenário adotado com a sinalização de pista apropriada. Uma vez nessa região, o veículo rápido para de tomar a decisão de realizar ultrapassagens. Isto ocorre mesmo quando existe um veículo lento à sua frente e a região de ultrapassagem na via oposta está livre. A extensão dessa região é definida pela distância percorrida pelo veículo, trafegando na velocidade máxima da via, ao ultrapassar um veículo lento. Ou seja, a região onde não é permitido ultrapassar mede uma ultrapassagem, considerando a velocidade máxima dos veículos simulados.

Figura 16 - Regiões do modelo onde não é permitido realizar ultrapassagens

Fonte: Próprio autor

Em modelos onde existe tráfego de veículos nas duas vias de sentido oposto podem ocorrer situações onde duas manobras de ultrapassagem, uma em cada via, ocorrem ao mesmo tempo. Neste caso, se o veículo que irá realizar a ultrapassagem considera apenas o veículo lento trafegando na via de sentido oposto (o primeiro veículo à sua frente) pode julgar a manobra segura e iniciá-la. No entanto, se há um veículo rápido atrás deste veículo lento que, da mesma forma, também começa uma ultrapassagem neste mesmo instante, pode ocorrer colisão entre esses veículos que realizam a manobra durante sua execução. Ao executarem a manobra, os veículos rápidos aumentam sua velocidade e passam os veículos lentos. Durante a ultrapassagem, em dado instante, o primeiro veículo que trafega em sentido oposto pode não ser mais o veículo lento que foi utilizado durante a verificação de trecho livre a frente e sim este veículo que realizou a ultrapassagem e se encontra à frente do veículo lento aplicando uma velocidade maior. Isto pode levar o veículo que realiza a ultrapassagem a um

estado inseguro durante a ultrapassagem, uma vez que toda a manobra é planejada e avaliada antes de sua execução. Para que essa limitação do cenário não afete os resultados da simulação, ao gerar colisões não relacionadas à comunicação em si, o modelo permite que apenas os veículos de uma via realizem ultrapassagens. Para isso, na via onde ocorrem ultrapassagens são inseridos veículos lentos em espaços regulares de tempo. Isso ocorre para garantir que sempre haja espaço suficiente entre dois veículos lentos subsequentes que comporte um veículo rápido após uma ultrapassagem sem colidir com o veículo mais à frente. Isto também permite que o modelo apresente apenas ultrapassagens do tipo normal. Já os veículos rápidos são inseridos probabilisticamente de forma a gerar diferentes situações de ultrapassagem. Na via oposta, os veículos inseridos servem como obstáculo para a manobra de ultrapassagem. Nela são inseridos veículos rápidos também de forma probabilística. Os veículos já são inseridos nas extremidades da via com sua velocidade de viagem. Os veículos lentos têm velocidade de viagem igual à sua velocidade máxima e mantêm essa velocidade constante até atingirem a outra extremidade da via. Por outro lado, os veículos rápidos apresentam velocidade de viagem igual à 50% de sua velocidade máxima. De toda forma, a velocidade de viagem dos veículos rápidos é maior que a dos veículos lentos (possibilitando, dessa forma, que os veículos rápidos tenham a necessidade de ultrapassar os veículos lentos). O modelo foi desenvolvido desta forma para que, durante a ultrapassagem, o veículo rápido possa aplicar uma aceleração constante até atingir 75% de sua velocidade máxima. No fim da manobra ele desacelera até a velocidade de viagem (50% de sua velocidade inicial). Desta forma a manobra de ultrapassagem se adequa à definição de ultrapassagem normal apresentada pela literatura. Entretanto, quando o veículo se encontra numa posição onde poderia iniciar a manobra, mas esta não pode ser realizada, há a necessidade de aplicar uma desaceleração que o leve a trafegar na mesma velocidade do veículo à sua frente. Toda aceleração dos veículos é constante e igual a sua capacidade de aceleração máxima. Essa característica é de grande importância para os cálculos realizados relativos à estimativa de execução da manobra.

Por ser um modelo descentralizado, onde o sistema de controle de cada veículo é o responsável pela tomada de decisões, não há a necessidade de envio de comandos de controle via sistema de comunicação (que existem no modelo de cruzamento de vias). Portanto, apenas BSM são trocadas entre os veículos do sistema. As BSM são

enviadas em intervalos regulares de tempo que podem ser configurados no modelo através do arquivo de inicialização da simulação. Neste arquivo é possível alterar o intervalo de envio de BSM e todos os veículos da simulação adotaram esse intervalo. Cada BSM contém as seguintes informações: Identificação do veículo emissor (adotou-se como identificação o endereço MAC do dispositivo de comunicação do veículo), as coordenadas de posicionamento, a velocidade máxima e instantânea, o sentido de orientação do veículo em relação à via, a aceleração máxima e instantânea, o estado de ultrapassagem e o instante de tempo do envio da mensagem.

O estado de ultrapassagem que é enviado na BSM representa o estado que o veículo se encontra com relação à execução de ultrapassagens. O estado `noOvertaking` (estado 0) indica que o veículo está trafegando em sua velocidade de viagem e não tem veículo lento à sua frente. O estado `waitingToOvertake` (estado 1) indica que o veículo está aguardando oportunidade de realizar a ultrapassagem sobre um veículo lento à sua frente. O veículo entra nesse estado em situações como tráfego na via oposta dentro de sua região de ultrapassagem (trecho da via oposta que é utilizado durante uma manobra de ultrapassagem) ou outro veículo à sua frente que já está ultrapassando o mesmo veículo. O estado `overtaking` (estado 2) indica que o veículo encontra-se realizando manobra de ultrapassagem sobre um veículo lento. A principal função desses estados de ultrapassagem é controlar a ordem de execução da manobra sobre os veículos lentos. O modelo define a ordem de ultrapassagem do veículo mais próximo ao veículo lento para o mais distante. Ou seja, o veículo rápido localizado logo após o veículo lento tem maior prioridade de ultrapassagem. Entretanto, sem essa informação, essa ordem não pode ser assegurada pois o veículo rápido sempre inicia uma ultrapassagem assim que haja oportunidade independentemente de o veículo à frente ser um veículo rápido aguardando oportunidade de ultrapassagem ou se é um veículo lento. Com essa informação é possível identificar o veículo à frente e realizar a manobra apenas quando o veículo à frente é realmente um veículo lento. O estado de ultrapassagem também permite que o veículo controle a restrição de não serem realizadas manobras de ultrapassagem sobre um mesmo veículo lento simultaneamente, ultrapassagens 2+. O veículo só inicia a manobra quando tem um veículo lento à sua frente e nenhum veículo com estado `overtaking` entre ambos ou à frente do veículo lento.

Cada veículo tem seu próprio mapa virtual. Ele agrupa os veículos de cada via em ordem de posicionamento e os mantém atualizados a partir dos novos dados recebidos pelas BSM. O mapa é acessado tanto pelo sistema de comunicação quanto pelo sistema de controle do veículo. Entretanto, estes acessos têm finalidades diferentes e são gerados por eventos distintos. A atualização realizada pelo sistema de comunicação está associada ao evento de recebimento de mensagem enquanto a consulta realizada pelo sistema de controle está associada à movimentação do veículo. Com relação à tomada de decisão, o mapa é a única fonte de informação existente uma vez que outros tipos de fonte de informação, (como sensores, por exemplo) não são considerados no modelo.

Outra característica muito importante do veículo modelado é sua Distância de Segurança (DS). Esta representa o comprimento de uma região à frente do veículo (a partir de sua extremidade frontal) que é constantemente monitorada pelo sistema de controle a fim de identificar qualquer tipo de obstáculo que possa eventualmente colidir com o veículo. A figura 17 apresenta dois veículos A e B com suas respectivas DS.

Figura 17 - Distância de Segurança

Fonte: Próprio autor

No modelo proposto, a DS tem o objetivo de estabelecer um distanciamento mínimo entre os veículos que garanta que cada veículo consiga evitar uma colisão traseira caso o veículo à sua frente aplique uma desaceleração abrupta. Portanto, a aplicação de controle monitora o veículo à frente e estabelece dinamicamente a DS com base nas velocidades do próprio veículo e do veículo à frente. Ou seja, a DS de cada veículo

tem um valor variável que é constantemente recalculado à medida que os veículos desenvolvem novas velocidades.

Na prática, o valor da DS pode representar a distância percorrida pelo veículo até atingir a velocidade do veículo à frente, quando este apresenta velocidade menor que a velocidade do veículo que calcula sua DS, ou a distância percorrida pelo veículo até parar o veículo (velocidade final 0), nos casos onde o veículo à frente tem velocidade maior que a velocidade do veículo que calcula sua DS. Portanto, a velocidade inicial usada no cálculo é a velocidade atual do veículo e a velocidade final é a velocidade do veículo à frente, quando esta é menor que a velocidade atual, ou 0, quando a velocidade do veículo à frente é maior que a velocidade atual. Entretanto, se o valor da DS calculada pelo método descrito acima é menor que o comprimento dos veículos do modelo aplica-se o comprimento do veículo como o valor da DS. Isto ocorre para que haja um distanciamento mínimo que permita desaceleração em casos com baixa frequência de envio de mensagens BSM (baixa frequência de atualização das informações dos veículos próximos). Portanto, o cálculo da DS é feito pela equação a seguir tendo como premissa que o veículo sempre aplica aceleração (e desaceleração) constante:

$$DS = \begin{cases} \frac{v_2^2 - v_1^2}{2 * a}, & v_1 < v_2 \\ \frac{v_2^2}{2 * a}, & v_1 > v_2 \\ C, & DS < C \end{cases}$$

Onde:

DS = distância de segurança para o veículo à frente;

v_1 = velocidade do veículo à frente;

v_2 = velocidade do próprio veículo;

a = aceleração do próprio veículo;

C = comprimento do veículo.

No modelo proposto, o veículo identifica a necessidade de realizar uma ultrapassagem ao ter um veículo à sua frente, trafegando no mesmo sentido, que apresenta velocidade menor que a atualmente desenvolvida por ele. Quando isso ocorre, o

veículo começa a considerar sua DS para o veículo lento à frente. Uma vez que a distância entre os dois veículos é igual à DS o veículo rápido está apto a realizar a ultrapassagem.

Para avaliar se a manobra pode ou não ser executada, a aplicação de controle do veículo faz algumas verificações. A primeira delas é checar se o veículo à frente é um veículo lento ou um veículo que aguarda uma oportunidade de ultrapassagem. Para isso, o sistema de controle verifica o estado de ultrapassagem do veículo em questão. Um veículo à frente que apresenta um estado 0 (noOvertaking) está trafegando sem qualquer veículo lento à sua frente. Portanto, trata-se de um veículo lento. Se o veículo à frente se encontra no estado 1 (waitingToOvertake) significa que este está aguardando oportunidade de ultrapassar e, por isso, encontra-se trafegando lentamente atrás de um veículo lento ou atrás de outro veículo rápido que também aguarda oportunidade de ultrapassar. Neste caso o veículo não tem permissão de ultrapassar visto que existe um ou mais veículos à sua frente com maior prioridade de ultrapassagem. Isto ocorre pois, no modelo desenvolvido, a ordem de prioridade de ultrapassagem se dá do primeiro veículo que aguarda ultrapassagem atrás do veículo lento para o último. Por fim, se o veículo à frente tem o estado 2 (overtaking) o veículo também não tem autorização, pois o modelo permite apenas ultrapassagens do tipo normal e não do tipo 2+. Por esse motivo, quando o veículo à frente é um veículo lento (estado 0) verifica-se também se existe um veículo à frente deste que já esteja realizando ultrapassagem. Quando isso ocorre, também não há permissão de ultrapassagem. Um cenário como esse pode ser visto na figura 18. Nesta situação, o veículo A identifica que o veículo B à frente é um veículo lento. Entretanto, o veículo A não tem permissão de ultrapassagem pois o veículo C ainda não completou a ultrapassagem sobre B. Com isso, o veículo A reduz sua velocidade de modo que a distância entre ele e B seja igual à sua DS, muda seu estado de ultrapassagem para waitingToOvertake, começa a transmitir esse novo estado de ultrapassagem em suas mensagens BSM e aguarda a ultrapassagem realizada pelo veículo C terminar (evento que é identificado através das BSM enviadas por esse veículo).

Figura 18 - Veículo rápido já ultrapassando veículo lento

Fonte: Próprio autor

Quando os veículos à frente apresentam uma configuração que permite que haja ultrapassagem (veículos B e C com estado 0), a próxima das etapas da avaliação da manobra pode ser executada. Esta consiste em checar se o espaço existente entre o veículo lento e um possível veículo a frente dele é suficiente para comportar o veículo que realiza a manobra (e sua distância de segurança). Se o modelo permitisse que dois veículos realizassem a ultrapassagem sobre um mesmo veículo lento ao mesmo tempo seria necessário considerar também o veículo que já encontra-se realizando a ultrapassagem durante o cálculo da distância do veículo que planeja realizar a manobra. Este fato eleva consideravelmente a complexidade deste procedimento, uma vez que é necessário estimar o posicionamento do veículo que se encontra realizando a ultrapassagem. Este veículo em geral está aplicando uma aceleração durante a ultrapassagem e ao final da manobra desacelera para a velocidade original que apresentava antes da manobra. Essa é um dos motivos pelos quais o modelo permite apenas ultrapassagens do tipo simples.

Para verificar se o espaço à frente do veículo lento é suficiente para comportar o veículo que realiza a ultrapassagem é necessário realizar alguns cálculos relativos à execução da manobra. O primeiro valor calculado é a distância entre os veículos. Que é apresentada na figura 19.

Figura 19 - Distância entre os veículos

Fonte: Próprio autor

A distância entre os veículos deve compreender também a região de segurança do veículo à frente visto que o veículo que realiza a ultrapassagem deve retornar para sua via após essa distância (na posição representada na figura 19 pelo veículo A*). Logo, a distância é calculada pela seguinte equação:

$$d = D + C_B + DS_B$$

Onde:

d = distância de entre o veículo e o ponto de retorno;

D = distância entre a extremidade dianteira do veículo A e a extremidade traseira do veículo B;

C_B = comprimento do veículo B;

DS_B = distância de segurança do veículo B.

Com o valor de d , o veículo consegue calcular o tempo de ultrapassagem, que consiste no espaço de tempo necessário desde a mudança para a via de sentido oposto até o retorno para a via de origem após a ultrapassagem, através da equação a seguir:

$$t = \frac{\sqrt{2 * a * d + (v_b - v_a)^2} - v_b + v_a}{a}$$

Onde:

t = tempo de ultrapassagem;

d = distância de entre o veículo e o ponto de retorno;

v_b = velocidade inicial do próprio veículo;

v_a = velocidade do veículo lento;

a = aceleração máxima do próprio veículo.

Por fim, com o valor do tempo de ultrapassagem, o veículo consegue calcular a distância de ultrapassagem, que consiste na distância total de deslocamento do veículo rápido durante a ultrapassagem. Para isso, o veículo utiliza a seguinte equação:

$$DU = v_a * t + \frac{a * t^2}{2}$$

Onde:

DU = distância de ultrapassagem;

t = tempo de ultrapassagem;

v_a = velocidade inicial do próprio veículo;

a = aceleração máxima do próprio veículo.

Estas equações consideram que o veículo lento apresenta velocidade constante (Movimento Uniforme) e que o veículo que realiza a ultrapassagem apresenta aceleração constante (Movimento Uniformemente Variado). Portanto, as equações acima são resultado da associação das equações desses dois tipos de movimento.

Entretanto, considerando que o veículo que ultrapassa aplica aceleração constante, mas tem velocidade máxima de ultrapassagem definida, podem ocorrer situações onde as equações anteriores não são suficientes para calcular o tempo e distância de ultrapassagem. Quando o veículo alcança a velocidade máxima durante a aceleração aplicada este para de acelerar e mantém a velocidade máxima. Na figura 20 estão indicados esses momentos durante o estado overtaking em duas ultrapassagens de um mesmo veículo. Nesse caso, o modelo calcula o tempo e o deslocamento efetuado até alcançar a velocidade máxima considerando a aceleração constante a ser aplicada e soma com o restante do tempo e deslocamento realizados em velocidade máxima constante.

A figura 20 apresenta a variação de velocidade apresentada pelo veículo e a associa diretamente com os estados de ultrapassagem que o veículo apresenta. No estado noOvertaking o veículo se desloca com velocidade constante igual a 50% de sua

velocidade máxima. Durante uma ultrapassagem, em estado overtaking, o veículo acelera com aceleração máxima e pode atingir 75% de sua velocidade máxima (igual à velocidade máxima da via). Se isso ocorre, o veículo mantém essa velocidade até o fim da manobra, onde ele retorna para sua via. Ao retornar, o veículo volta para o estado noOvertaking, se não houver outro veículo lento à sua frente, onde ele desacelera novamente para a velocidade de 50% da sua velocidade máxima ou vai para o estado waitingToOvertake, se houver outro veículo lento à sua frente e não for possível iniciar a manobra de ultrapassagem, onde ele desacelera para a velocidade do novo veículo lento à frente.

Figura 20 - Variação da velocidade durante duas manobras de ultrapassagens

Fonte: Próprio autor

Com o valor de DU o veículo é capaz de estimar sua futura DS (denominada DS_A^* na figura 21) e identificar se a distância entre sua futura posição após a ultrapassagem e o possível veículo à frente é suficiente. No caso de não haver um veículo após o veículo lento, verifica-se o espaço entre a futura posição e o final da região de ultrapassagens.

Figura 21 – Futura distância de segurança

Fonte: Próprio autor

Com os valores de t e DU , o veículo também é capaz de avaliar os veículos que trafegam na via de sentido oposto e identificar se existe a possibilidade de alguma colisão frontal durante a ultrapassagem. Para isso, o veículo estima a posição do primeiro veículo à sua frente que trafega na via de sentido contrário no instante t . Neste cálculo o veículo considera que o veículo em questão manterá sua velocidade constante durante todo o intervalo de tempo t . Com isso, o veículo verifica se a posição estimada encontra-se dentro da área de ultrapassagem, desde sua posição atual até o ponto DU . Se a posição estimada está dentro da região de ultrapassagem o veículo não tem autorização de iniciar a manobra. Portanto ele muda seu estado de ultrapassagem para 1 e aguarda a passagem do veículo que trafega na via oposta para novamente avaliar a manobra. Se não há risco de colisão o veículo inicia a manobra de ultrapassagem e começa a informar este seu novo estado.

Ao concluir a ultrapassagem (ou seja, quando o veículo que realiza a manobra se encontra na posição definida como a final na via de sentido oposto) o veículo deve retornar para sua via. Neste instante, o veículo que realiza a manobra deve estar com sua extremidade à frente do final da nova região de segurança do veículo lento. Justifica-se essa nova distância de segurança pois, a partir deste momento, o veículo lento que foi ultrapassado vai considerar esse novo veículo à sua frente para calcular sua distância de segurança. Ao finalizar a ultrapassagem o veículo muda seu estado de ultrapassagem para noOvertaking e começa a enviar esse valor nas suas BSMs. Neste ponto o veículo também desacelera para aplicar novamente sua velocidade de viagem normal (a mesma apresentada antes de se aproximar do veículo lento).

Cada veículo do modelo, a cada passo de simulação, atualiza o posicionamento dos demais veículos no seu mapa virtual com base em sua última mensagem recebida de

cada um. Levando em consideração as premissas estabelecidas de aceleração constante e velocidade constante, o veículo é capaz de estimar e atualizar velocidade e posicionamento de cada veículo presente em seu mapa. Este é um processo importante que visa manter o mapa virtual o mais próximo da realidade para a tomada de decisão mesmo em cenários degradados.

O modelo apresenta uma limitação relacionada a troca de vias nas equações. Estas não consideram a manobra de troca de vias pelo fato de a ferramenta de simulação Sumo não simular essa manobra de forma precisa. O simulador Sumo não considera mudança suave entre vias. Quando o veículo troca de via ele é retirado de sua via original e inserido na via de destino no passo de simulação seguinte. Para considerar a troca de vias no modelo seria necessário alterar o comportamento do simulador Sumo ou utilizar outro simulador. Como a alteração do comportamento do simulador de tráfego foge do escopo desta pesquisa e pelo fato do Sumo apresentar maiores vantagens em outros quesitos se comparado a outros simuladores o modelo desenvolvido também apresenta esta limitação.

6 ANÁLISE DOS DADOS

A análise destes modelos tem o objetivo de avaliar como a degradação de determinadas características do sistema de comunicação DSRC pode levar o sistema de controle dos veículos a um estado inseguro e, conseqüentemente, gerar colisões nos cenários simulados. Através dela, os modelos de simulação propostos também foram avaliados quanto a sua capacidade de simular e disponibilizar dados para análise da comunicação DSRC, do ambiente veicular e da interação entre ambos. Para isso, foram realizados experimentos controlando determinados parâmetros da camada de aplicação e avaliando o impacto no sistema.

O cenário de simulação foi definido, com base na literatura, estipulando os parâmetros tanto da comunicação DSRC quanto da dinâmica veicular e ambiente de simulação. A tabela 3 apresenta os principais parâmetros, seus valores definidos na literatura e os estabelecidos nesta pesquisa. A seguir, estão os trabalhos utilizados como base para compor a configuração adotada no modelo:

- Artigo 1: LTE and IEEE 802.11p for vehicular networking: a performance evaluation (HAMEED MIR e FILALI, 2014)
- Artigo 2: Performance comparison between IEEE 802.11p and LTE-V2V in-coverage and out-of-coverage for cooperative awareness (CECCHINI, BAZZI, *et al.*, 2017)
- Artigo 3: 3GPP C-V2X and IEEE 802.11p for Vehicle-to-Vehicle communications in highway platooning scenarios (VUKADINOVIC, BAKOWSKI, *et al.*, 2018)
- Artigo 4: Performance evaluation of safety applications over DSRC vehicular ad hoc networks (YIN, ELBATT, *et al.*, 2004)
- Artigo 5: Delay analysis and study of IEEE 802.11p based DSRC safety communication in a highway environment (YAO, RAO, *et al.*, 2013)

Também com base na literatura, foram selecionados os parâmetros que mais afetam o desempenho da rede DSRC para serem avaliados neste trabalho. Nos experimentos realizados, foram analisados a latência do sistema de comunicação, a frequência de envio de mensagens e o raio de comunicação de cada nó da rede.

Tabela 3 - Principais parâmetros de simulação

Parâmetros		Artigo 1	Artigo 2	Artigo 3	Artigo 4	Artigo 5	Valores Utilizados
Aplicação	Frequência de envio de mensagens	1 Hz, 4 Hz, 8 Hz, 10 Hz, 20 Hz	10 Hz	10 Hz	1 Hz a 10 Hz	12 Hz (2 Hz em AC0 e 10 Hz em AC1)	5 Hz, 7 Hz, 10 Hz, 15Hz e 20 Hz
	Latência	0 s a 2 s	-	-	0 s a 0.1 s	0.015 s a 0.325 s (camada MAC)	0.05 s, 0.1 s, 0.25 s, 0.37 s e 0.5 s
	Tamanho da mensagem enviada	256 bytes	190 bytes e 300 bytes	300 bytes	100 bytes e 200 bytes	500 bytes	300 bytes
	Raio de comunicação*	250 m	50m, 100m, 150m, 200m, 250m, 300m, 350m, 400m, 450m e 500m	-	300 m	500 m	400 m, 300 m, 250m, 200 m e 100 m
Simulação	Densidade de veículos	25 m, 50 m, 75m, 100m, 125 m e 150 m	-	0, 5, 10, 20 carros/km/via (2 vias em cada um dos 2 sentidos)	100 veículos transitando no cenário	0,01 veículo/m a 0,1 veículo/m	Cruzamentos = Probabilidade de 0.3 de inserir veículo/s Ultrapassagens = Probabilidade de 0.3 de inserir veículo/s (veículo lento e rápido em sentido contrário) e 1 veículo/2s para veículos rápidos que realizam ultrapassagem

Parâmetros		Artigo 1	Artigo 2	Artigo 3	Artigo 4	Artigo 5	Valores Utilizados
PHY e MAC	Duração da simulação	100 s	90 s	-	100 s	-	200 s
	Área de simulação	2 km X 2 km	-	-	6.6 km X 4.2 Km	Rodovia de 2.2 km	Cruzamentos = 700 m X 700 m Ultrapassagens = 400 m X 150 m
	Velocidade dos veículos	20 Km/h a 100 Km/h (de 20 em 20 Km/h)	50 km/h	80 Km/h a 35 Km/h (Caminhões) 100 Km/h (Outros veículos)	75 mi/h	-	Estabelecida pela aplicação de controle
	Frequência	5.9 GHz	5.9 GHz	5.9 GHz	5.9 GHz	5.9 GHz	5.9 GHz
	Largura de banda	10 MHz	10 MHz	10 MHz	10 MHz	10 MHz	10 MHz
	TX Power	25 dBm	23 dBm	23 dBm	17 dBm		23 dBm
	Data rate	6 Mbps	-	-	3 Mbps, 4.5 Mbps, 6 Mbps, 9 Mbps, 12 Mbps, 18 Mbps, 24 Mbps, 27 Mbps	3 Mbps	6 Mbps
	Modelo de propagação	Combinação dos modelos Three Log Distance (propagação) e Nakagami (Desvanecimento de canal)	-	Modelo Winner combinado com modelo B1 LOS	-	-	Cruzamentos = Modelo Simple Obstacle Shadowing Ultrapassagens = Modelo Vehicle Obstacle Shadowing

Fonte: Próprio autor

A frequência de envio de mensagens é relevante pois define os intervalos de atualização de informações de cada veículo para os demais dentro de seu raio de comunicação (YAO, RAO, *et al.*, 2013). É através dela que se tem a taxa de atualização da consciência do ambiente ao redor do veículo com base no estado atual dos parâmetros transmitidos pelos veículos dentro da área de comunicação. Uma alta frequência de envio de BSMs faz com que cada veículo atualize seu mapa virtual em uma taxa alta com as informações recebidas dos demais veículos próximos. Característica essa de grande importância na identificação de possíveis situações de risco pois é com base nas informações do mapa virtual que são tomadas as decisões de controle do veículo. Um mapa virtual atualizado reflete o estado atual do ambiente onde se encontra o veículo. Por outro lado, uma alta frequência de envio de mensagens degrada a qualidade dos canais de comunicação à medida que mais nós da rede compartilham o mesmo meio de comunicação (VUKADINOVIC, BAKOWSKI, *et al.*, 2018). Uma maior frequência de envio de mensagens aumenta a latência na comunicação e a perda de pacotes por colisão. Nos experimentos realizados, a variação na taxa de envio de mensagem tem objetivo de simular diferentes condições deste parâmetro para o receptor destas mensagens. Isso simula situações, mesmo que periódicas, onde parte das mensagens de determinado emissor não alcançam este receptor e como este lida com uma taxa de atualização inferior à apropriada. A latência da comunicação é a métrica que estabelece o atraso da transmissão do pacote desde a origem até seu destino. É uma métrica muito utilizada em redes de computadores e de grande relevância especialmente em redes wireless. Neste contexto, a latência pode ser medida em diferentes camadas da pilha de protocolos de rede e, em geral, é resultado de condições adversas do canal de comunicação, como uma alta carga de nós e mensagens transmitidas no canal de comunicação compartilhado que elevam o tempo gasto pelo nó para transmitir suas mensagens, como foi observado anteriormente. Portanto, para analisar esse parâmetro em específico de forma controlada, o modelo proposto define um valor mínimo para a latência da comunicação que representa o atraso de transmissão de cada mensagem desde sua saída da aplicação do veículo de origem até a recepção pela aplicação no veículo de destino. Portanto, configurando-se uma latência aplicação-aplicação. Nos modelos propostos, a latência foi implementada na aplicação do emissor de forma que esta, ao gerar as mensagens a serem transmitidas, aguarda o tempo de latência

estabelecido para efetivamente enviá-las na rede. Com isso, a latência final corresponde à espera para transmissão somada ao tempo de transmissão. Este último é controlado pelo Veins e apresenta um valor de aproximadamente 5% da latência controlado pela aplicação de origem. Desta forma, o modelo consegue simular de forma controlada a latência, que é produto de vários fatores do meio de transmissão, e possibilita a análise de seus impactos no sistema de tomada de decisão.

O raio de comunicação define a área dentro da qual a mensagem de um nó da rede consegue alcançar outros nós. Região na qual estão localizados outros veículos que conseguem receber as mensagens enviadas por um veículo transmissor. Esse parâmetro é importante por definir a região de comunicação de cada veículo e estabelecer a área onde cada veículo consegue obter informações através de comunicação para compor sua consciência situacional do ambiente. É um parâmetro de grande importância em especial em cenários onde há muita mobilidade e a tomada de decisão precisa considerar regiões maiores ao entorno do veículo, como cenários de ultrapassagem em vias de mão dupla, por exemplo. Na prática o raio de comunicação depende da potência de transmissão e do desvanecimento do sinal gerado (YAO, RAO, *et al.*, 2013). Entretanto, o modelo define diretamente o raio de comunicação dos veículos de forma a controlar e permitir a análise do impacto de condições degradadas deste parâmetro no sistema de controle.

Tabela 4 - Valores dos parâmetros avaliados

Parâmetro	Valores Simulados
Taxa de envio de mensagens (Hz)	20, 15, 10, 7 e 5
Raio de comunicação (m)	400, 300, 250, 200 e 100
Latência de comunicação (s)	0.05, 0.1, 0.25, 0.37 e 0.5

Fonte: Próprio autor

Esses parâmetros receberam os valores presentes na tabela 4 para as simulações realizadas. Também foram definidos 3 cenários apresentados na tabela 5 que apresentam o melhor, pior e o valor médio de cada parâmetro. Com isso, os experimentos foram conduzidos de forma que cada parâmetro analisado fosse simulado nos 3 cenários distintos dos demais parâmetros.

Tabela 5 - Cenários dos parâmetros analisados

Cenário	Parâmetro		
	Taxa de envio de mensagens	Raio de comunicação	Latência de comunicação
Bom	20 Hz	400 m	0.05 s
Intermediário	10 Hz	250 m	0.25 s
Ruim	5 Hz	100 m	0.5 s

Fonte: Próprio autor

Os experimentos foram realizados configurando os parâmetros dos modelos com os valores previamente definidos na tabela 3. Em cada experimento, o parâmetro avaliado recebe os valores apresentados na tabela 4 e o cenário, composto pelos outros parâmetros avaliados, é definido com os valores apresentados na tabela 5.

Cada experimento foi executado 31 vezes, que configura um tamanho de amostra com nível de confiança de 90% e 15% de margem de erro. Esse tamanho de amostra foi definido por representar um tamanho viável, dado que cada execução dos modelos dura algumas horas para ser realizada (o tempo de execução da simulação varia de acordo com a configuração aplicada). Portanto, um nível de confiança maior ou uma margem de erro menor aumentariam o tamanho da amostra para um valor inviável de ser realizado. Portanto, os resultados apresentados a seguir mostram as medias amostrais de colisões resultantes das simulações em cada um desses cenários ao experimentar cada valor dos parâmetros sob investigação. Inicialmente são exibidos os resultados do modelo de interseção de vias e, em seguida, os resultados do modelo de ultrapassagens.

6.1 Modelo de controle de interseção de vias

A figura 22 apresenta a média de colisões ocorridas em cada experimento ao aplicar as diferentes taxas de envio de mensagens. Cada cenário é caracterizado pelos valores de raio de comunicação e latência. Os resultados mostram que não houve aumento significativo na quantidade média de colisões no cenário bom (diferença de 0,064 colisão média entre as taxas de envio de 20 Hz e 5 Hz). Da mesma forma o cenário intermediário (diferença de 0,25 colisão) e o cenário ruim (diferença de 0,35 colisão) também não apresentaram aumento relevante. Estes resultados indicam que a degradação apenas da taxa de envio de mensagens não impacta diretamente a ocorrência de colisões entre veículos neste cenário. A diferença nos resultados se dá principalmente pela configuração dos cenários. Portanto, reflexo da degradação dos outros parâmetros.

Figura 22 - Média de colisões para cada taxa de envio de BSM no modelo de interseção de vias

Fonte: Próprio autor

Na figura 23 estão as médias de colisões que ocorreram ao simular os valores de raio de comunicação dos veículos nos cenários de latência e taxa de envio de mensagens. Nestas simulações, houve aumentos consideráveis na média de colisões tanto no cenário bom (diferença de 0,58 colisão entre o um raio de comunicação de 400 metros e um raio de comunicação de 100 metros) quanto no cenário ruim (diferença de 0,61). Apenas o cenário intermediário que apresentou aumento menor (diferença de 0,32 colisão). Este resultado pode indicar que o raio de comunicação, por si só, já pode causar colisões neste modelo. O cenário ruim foi o que apresentou mais colisões.

Figura 23 - Média de colisões para cada raio de comunicação no modelo de interseção de vias

Fonte: Próprio autor

A figura 24 apresenta os resultados da simulação dos valores de latência na comunicação. Aqui, em todos os cenários, houve aumento na média das colisões a experimental valores maiores de latência. O cenário bom teve um aumento de 1,29 colisão comparando-se os resultados com latência de 0,05 segundo com 0,5 segundo. Já o cenário intermediário apresentou aumento de 1,25 colisão e o cenário ruim um aumento de 1,90 colisão. Isto indica que apenas este parâmetro é capaz de degradar a segurança do sistema ao ponto de causar colisões entre veículos.

Figura 24 - Média de colisões para cada latência da comunicação no modelo de interseção de vias

Fonte: Próprio autor

A partir desses resultados (e com base na observação do comportamento do modelo durante a execução dos experimentos) é possível notar que uma baixa frequência de envios de BSM não causa diretamente as colisões. A degradação deste parâmetro no modelo é compensada principalmente pela atualização do mapa virtual realizada por estimativas a cada passo de simulação com base nas informações da última mensagem recebida de cada veículo. Embora este processo de estimativa acabe inserindo erros cumulativos (frutos da própria estimativa), estes não chegam a causar tanto risco ao veículo neste modelo. Por outro lado, a degradação da latência, do raio de comunicação e principalmente a degradação associada de ambos se mostra diretamente relacionada com a ocorrência de colisões no modelo. Quando estas métricas são degradadas, mesmo no cenário bom, uma quantidade considerável de colisões ocorre.

Um outro detalhe observado ao depurar as simulações com latência degradada foi que as mensagens que eram enviadas pelos veículos quando estes se encontravam depois do cruzamento nem chegavam a ser enviadas. Isto ocorre pois no modelo a região da via após a região de interseção é bem curta. Com isso, o veículo, ao passar da região de interseção, gerava a mensagem indicando o cruzamento realizado com

sucesso, mas era removido do modelo antes de enviá-la. Portanto, a passagem pelo cruzamento nem chega a ser confirmada pela RSU. Isto fazia com que o modelo identificasse falsas colisões entre os veículos pois, até então, a RSU utilizava o timeout de envio de mensagens para identificar uma colisão. O veículo não informava que havia cruzado a interseção em segurança (fato que fazia a RSU devolver o controle ao próprio veículo) e ficava um tempo maior do que o estabelecido para identificar um veículo colidido. Para contornar este problema, que foi identificado durante o desenvolvimento, o modelo foi alterado para identificar as colisões a partir do retorno do Sumo ao final da execução de cada simulação via TraCI. Portanto, os resultados aqui apresentados já foram coletados utilizando esta nova implementação. A análise da execução dos experimentos mostrou que quando o raio de comunicação é reduzido o veículo demora mais para ser incluído na CR por parte da RSU. Nestes casos, o veículo já se encontra fisicamente na região de controle da RSU, mas não está sob controle desta. Esta característica, associada a um cenário com latência maior, causa perturbações principalmente em garantir a separação mínima entre os veículos e na capacidade da RSU de corrigir a rota dos veículos em tempo suficiente para evitar as colisões.

6.2 Modelo de controle de ultrapassagens

Na figura 25 estão os resultados dos experimentos com diferentes taxas de envio de mensagens nos cenários de raio de comunicação e latência. No cenário bom houve apenas uma colisão em uma das 31 execuções do modelo com taxa de envio de mensagens de 5 Hz. Os resultados no cenário intermediário são semelhantes aos do cenário bom. Apenas uma colisão ou duas para cada taxa de envio de mensagens. Desta forma, a média das 31 execuções é inferior a 0,06 colisão em cada experimento do envio de mensagem no cenário intermediário. Apenas ocorreram quantidades mais significativas de colisões no modelo quando se aplicou o cenário ruim (com piores valores para latência e raio de comunicação).

Figura 25 - Média de colisões para cada taxa de envio de BSM no modelo de ultrapassagens

Fonte: Próprio autor

A figura 26 exibe a média de colisões ocorridas nos experimentos do raio de comunicação com cenários de latência e taxa de envio de mensagens. Os resultados mostram que houve poucas colisões no modelo para os cenários bom e intermediário quando o raio de comunicação é de até 200 metros. Novamente, apenas uma ou duas colisões em cada experimento. Com isso, a média das execuções de cada experimento com raio de comunicação entre 400 metros e 200 metros é inferior a 0,06 colisão.

No cenário ruim há uma média um pouco maior de colisões, se comparada às médias dos cenários bom e intermediário. Neste cenário, a média de colisões fica entre 0,7 e 1,25 colisão para os valores de raio de comunicação entre 400 e 200 metros. Isso indica que a degradação conjunta da latência de comunicação e taxa de envio de mensagens pode causar aumento de colisões neste cenário.

Os três cenários apresentaram elevado número de colisões nos experimentos com raio de comunicação de 100 metros. Como é detalhado mais à frente no texto, isto ocorre, pois, este raio de comunicação é menor que a distância percorrida pelo veículo para realizar a ultrapassagem. Com o raio de comunicação degradado, no início da

manobra, o veículo não consegue identificar obstáculos em todo o trajeto que ele percorrerá na via de sentido oposto.

Figura 26 - Média de colisões para cada raio de comunicação no modelo de ultrapassagens

Fonte: Próprio autor

Na figura 27 estão os resultados da experimentação do modelo com os valores de latência definidos nos cenários de taxa de envio de mensagens e raio de comunicação. Assim como ocorreu nos experimentos de taxa de envio de mensagens, estes resultados apresentam uma média de colisões significativa apenas no cenário ruim.

No cenário bom e intermediário a média de colisões foi inferior à 0,129 colisão para cada valor de latência de comunicação. Entretanto, no cenário ruim (onde os parâmetros de taxa de envio de mensagens e raio de comunicação são configurados com os piores valores definidos para cada um) a média de colisão em cada caso de teste foi superior a 15,9.

Figura 27 - Média de colisões para cada latência da comunicação no modelo de ultrapassagens

Fonte: Próprio autor

A baixa ocorrência de colisões nos cenários bom e intermediário e um elevado número de colisões no cenário ruim, ao avaliar a latência de comunicação e a taxa de envio de mensagens, indicam que um dos parâmetros degradados no cenário ruim está causando grande parte dessas colisões. Analisando os resultados dos experimentos do raio de comunicação, é possível comprovar que este é o parâmetro que causa este comportamento. A ocorrência de colisões em todos os cenários quando se aplica um raio de comunicação de 100 metros indica que a degradação deste parâmetro está diretamente associada ao elevado número de colisões.

A análise da execução deste modelo mostrou que a distância percorrida por um veículo rápido, ao realizar uma ultrapassagem sobre um veículo lento, varia de acordo com a velocidade do início da manobra. Em situações onde o veículo rápido não precisa desacelerar antes de realizar a manobra a distância de ultrapassagem é, em média, 140 metros (para a configuração adotada no modelo). Isto ocorre quando não há obstáculos na via oposta dentro da área que o veículo rápido vai percorrer para ultrapassar o veículo lento. Neste caso, o veículo rápido se aproxima do veículo lento e já inicia a ultrapassagem assim que sua distância para o veículo à frente é igual à sua distância de segurança. Já em situações onde o veículo rápido se encontra em

estado “waitingToOvertake” e inicia a manobra com velocidade igual à velocidade do veículo lento à frente, a distância de ultrapassagem é de, em média, 160 metros. Portanto, ao utilizar um raio de comunicação de 100 metros, o veículo rápido não consegue identificar obstáculos dentro de toda a área percorrida por ele para ultrapassar um veículo lento. Com isso, as colisões apresentadas no modelo ocorrem principalmente devido ao fato do raio de comunicação ser menor que a distância de ultrapassagem do veículo rápido.

Com base nos resultados dos dois modelos e nas observações realizadas durante os experimentos foi possível notar alguns comportamentos do sistema que são relevantes para a segurança do veículo no contexto de prevenção de colisões. Em ambos os modelos, a alta latência faz com que cada veículo receba informações desatualizadas dos demais. Isto impacta diretamente a segurança da tomada de decisão. Não há um estado de exatidão do mapa virtual para a tomada de decisão quando a latência é alta mesmo utilizando-se os mecanismos de atualização dos mapas virtuais baseados em estimativas. Com este parâmetro degradado, qualquer evento inesperado (como a necessidade de uma frenagem brusca de algum veículo, por exemplo) demora a ser recebida pelos demais. Quando isso ocorre, os demais veículos continuam estimando o posicionamento deste veículo (e demais características) de forma equivocada (com base nas últimas informações recebidas) e, conseqüentemente, tornando a tomada de decisão arriscada.

A atualização estimada do mapa também insere erro nos dados de cada veículo à medida que a frequência de envio de mensagens diminui. Esses erros levam o sistema de tomada de decisão a um estado inseguro ao utilizar dados incorretos do mapa virtual. Isto pode levar o veículo a realizar uma manobra que pode causar colisão com o veículo que apresenta a característica degradada.

Com relação ao modo de configuração dos parâmetros de entrada do modelo e aos dados de saída produzidos por sua execução, o modelo apresenta um modo de configuração rápido e um modo de saída padronizado que facilita a análise dos resultados da simulação. Os parâmetros de entrada podem ser configurados diretamente no arquivo de inicialização do modelo. Este arquivo concentra os parâmetros do modelo tornando seu uso de fácil adaptação para outros tipos de análise. Quando o modelo é executado, este arquivo é lido e configura a simulação de acordo com o objetivo de estudo desejado. Considerando as limitações do modelo

que foi desenvolvido, os dados de saída produzidos pela execução do modelo permitiram avaliar o impacto gerado pela degradação de alguns dos parâmetros do sistema de comunicação na ocorrência de colisões entre os veículos autônomos nos cenários simulados.. Entretanto, ainda é necessário inserir mais algumas métricas no modelo que auxiliem a identificar o momento exato de cada colisão. Isto facilita depurar o comportamento e o estado do sistema de controle no momento em cada colisão. O modelo atualmente já identifica a quantidade de colisões e o tipo de cada uma delas (colisão traseira, colisão dianteira ou colisão lateral). Entretanto, falta ainda apresentar saídas de como eram as condições dos dados disponíveis no momento da tomada de decisão que causaram cada colisão. Esta limitação pode ser considerada numa pesquisa futura para melhoria do modelo proposto.

7 CONCLUSÃO

Os resultados da utilização destas ferramentas mostram que a degradação do sistema de comunicação pode levar o sistema de controle a um estado inseguro onde a ocorrência de colisões entre os veículos nos dois cenários modelados é possível. Em situações com grande mobilidade, como o cenário de ultrapassagens em vias de mão dupla, o raio de comunicação é o principal parâmetro a afetar a segurança do veículo. Já em cenários com maior densidade de veículos e maior proximidade entre eles a combinação de parâmetros degradados causa o aumento na ocorrência de colisões (em especial um raio de comunicação pequeno e uma latência alta).

Os resultados do modelo de ultrapassagem corroboram com os resultados obtidos pelo modelo utilizado como referência inicial desta pesquisa, o trabalho de Motro. Isso indica a validade do modelo proposto para simular situações de ultrapassagem entre veículos que utilizam um sistema de comunicação DSRC. Os resultados do modelo de cruzamento não são comparáveis com os do sistema de controle ACUTA e do trabalho de Miculescu e Karaman. O trabalho do ACUTA tem objetivo de analisar questões de sustentabilidade de uma interseção de vias automatizada, como redução de tempo de passagem, emissão de poluente e utilização de energia. O trabalho de Miculescu e Karaman tem o foco na proposta teórica do sistema de controle de interseção e sua prova de conceito, não considerando o sistema de comunicação. Entretanto, o modelo foi desenvolvido com base nestes dois trabalhos que comprovam sua eficiência e eficácia em controlar uma interseção de vias, mesmo que os trabalhos base tenham objetivos distintos deste.

Essa convergência dos resultados obtidos com os apresentados pela literatura comprova a capacidade de simulação que os modelos propostos apresentam. Com isso, os modelos de ultrapassagem e de interseção de vias se mostraram ferramentas úteis para análise do comportamento da tecnologia DSRC nestes cenários e dos impactos desse sistema na tomada de decisão dos veículos autônomos. Portanto, os modelos podem fornecer informações relevantes para a análise de segurança de comunicação.

Os resultados obtidos também permitem estabelecer um nível mínimo de desempenho do DSRC para garantir a segurança dos veículos autônomos que utilizarem os dados provenientes deste sistema para a tomada de decisão. Com base

nas configurações adotadas no modelo, é possível definir alguns requisitos mínimos para estas métricas nos cenários avaliados. Para um cenário de interseção de vias o sistema de comunicação deve apresentar, no mínimo, um raio de comunicação de 300 metros (no cenário bom da figura 23 é o ponto no qual ocorre a primeiro aumento significativo na média de colisões), uma taxa de envio de mensagens de 15 Hz (no cenário intermediário da figura 22 é o ponto no qual ocorre um leve aumento na média de colisões) e uma latência máxima de 0,1 segundo (em todos os cenários da figura 24 é o ponto no qual ocorre a primeiro aumento significativo na média de colisões). Já para o cenário de ultrapassagens o sistema DSRC deve ter um raio de comunicação maior que 200 metros, de acordo com as condições de experimentação utilizadas. Ressaltando que estes valores se aplicam a um cenário com características semelhantes às adotadas no modelo (velocidade dos veículos, características do cenário, entre outras). Para situações diferentes estes valores mínimos podem sofrer alterações.

Uma possível alteração que pode ser aplicada para contornar essas limitações do DSRC é a inclusão de medidas mitigatórias com a finalidade de garantir tais níveis de comunicação. Uma dessas é a adoção de mais de um meio de comunicação entre os veículos, como a utilização tanto do DSRC e do C-V2X (ou NR V2X) em redundância. Desta forma, um sistema de comunicação pode compensar a degradação do outro e assegurar um nível de segurança para o veículo.

7.1 Trabalhos futuros

Durante a execução desta pesquisa algumas ideias de temas que podem dar continuidade a este trabalho foram levantadas. Entretanto, por extrapolarem os objetivos da pesquisa atual, foram consideradas linhas de pesquisa futuras relacionadas com o tema aqui abordado. A lista a seguir resume estes principais temas.

- Ao fim desta pesquisa, a FCC, órgão do governo norte americano que regula o uso do espectro de rádio, tomou a decisão de alterar a porção de banda na faixa de 5.9 GHz antes alocada exclusivamente para ITS em DSRC. A faixa de frequência, que anteriormente ia de 5.850 GHz a 5.925 GHz, agora foi reduzida para a faixa de 5.895 GHz a 5.925 GHz. Além disso, a FCC não estabelece mais o DSRC como tecnologia

exclusiva para operar nesta faixa de frequência. Em vez disso, o uso do C-V2X na faixa de 5.905 GHz a 5.925 GHz é indicada e fica opcional o uso de DSRC ou C-V2X no canal de 10 MHz entre 5.895 e 5.905GHz, como mostra a figura 28. Isso tem um impacto direto no desempenho do DSRC e, conseqüentemente, pode decretar o fim da adoção desta tecnologia ITS (FCC, 2020). Com isso, resta apenas o sistema ITS-G5 que se baseia nos protocolos 802.11p. Diante disto, um trabalho futuro diretamente ligado à continuidade desta pesquisa é a implantação dos modelos aqui propostos em outros RATs, como o C-V2X (LTE V2X) ou os mais recentes 5G NR V2X ou IEEE 802.11bd. Isso possibilitaria comparar o desempenho dos modelos em diferentes RATs e avaliar qual deles melhor atende às necessidades de cada sistema de controle do veículo autônomo.

Figura 28 - Proposta da FCC para a frequência antes alocada ao DSRC

Fonte: Relatório da FCC (FCC, 2020)

- Incluir no modelo outras fontes de dados para a aplicação de tomada de decisão, como os sensores on-board. Isso possibilitaria a análise de dados provenientes de outros sistemas e os possíveis conflitos de informações provenientes dessas diferentes fontes. Assim será possível avaliar tomadas de decisão em situações mais complexas e seu impacto na segurança do veículo.
- Esta pesquisa avalia os principais parâmetros apontados pela literatura como sendo as principais características de rede que podem afetar a tomada de decisão dos veículos autônomos. Entretanto, utilizando o modelo proposto é possível avaliar outros parâmetros da rede (como data rate ou tamanho da mensagem trocada entre os veículos) ou características do ambiente simulado (como diferentes densidades de veículos dentro da área de comunicação ou maior variação na velocidade dos veículos) que podem sofrer degradação e impactar o sistema de tomada de decisão.
- Os parâmetros de comunicação avaliados neste trabalho foram simulados com valores apresentados pela literatura e valores degradados. O modelo de mobilidade e

os demais parâmetros do modelo de comunicação foram definidos com base nos valores apresentados pela literatura (como é apresentado na tabela 3). Entretanto, não foi realizada uma análise de sensibilidade desses demais parâmetros não avaliados diretamente nesta pesquisa. Portanto, um trabalho futuro de grande relevância é a realização de uma análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo de forma a compreender como o cenário e o comportamento dos veículos impacta no sistema de comunicação e na tomada de decisão.

- Foi listado como limitação do modelo a falta de implementação das manobras de troca de via. O modelo não as considera pois o Sumo não implementa uma troca de vias precisa. Para realizar a troca de vias o Sumo apenas remove o veículo da via de origem e insere na de destino no passo de simulação seguinte. Estudos mais detalhados sobre esta manobra mostram que o motorista humano leva $1.5 \text{ s} \pm 0.5 \text{ s}$ para sair de sua via e alcançar a via de sentido oposto e $4.2 \text{ s} \pm 2.3 \text{ s}$ para retornar à sua via de origem após ultrapassar o veículo lento (HEGEMAN, BROOKHUIS e HOOGENDOORN, 2005). Portanto, essas manobras são relevantes e um trabalho futuro pode as implementar tanto no modelo de controle e comunicação quanto no ambiente de simulação Sumo considerando a realização da manobra por um veículo autônomo.

- No modelo de simulação de ultrapassagens, é possível considerar outros tipos de ultrapassagem além da ultrapassagem normal. Isso pode fazer com que o modelo se torne mais dinâmico permitindo um número maior de manobras. Com isso, novas características do modelo podem ser avaliadas.

- No modelo de simulação de interseção de vias, uma possibilidade é utilizar outras configurações de cruzamento de vias mais complexos, como vias de sentido duplo de rodagem, mais de uma via no mesmo sentido, outros formatos de interseção, entre outros. Isto possibilita avaliar se a configuração ou maior complexidade do cenário de interseção pode afetar o sistema de tomada da decisão presente na RSU.

REFERÊNCIAS

3GPP. About 3GPP Home. **3GPP**, 2019. Disponível em: <<https://www.3gpp.org/about-3gpp/about-3gpp>>. Acesso em: 04 Janeiro 2019.

ABUELSAMID, S. Volkswagen Adds 'Vehicle-To-Everything' Communications To Revamped Golf With NXP Chips. **Forbes**, 2019. Disponível em: <<https://www.forbes.com/sites/samabuelsamid/2019/10/28/volkswagen-includes-nxp-v2x-communications-in-8th-gen-golf/?sh=4b0df10916bc>>. Acesso em: 16 Novembro 2019.

AHMED-ZAID, F. et al. **Vehicle-to-Vehicle Safety System and Vehicle Build for Safety Pilot (V2V-SP) Final Report, Volume 2 of 2, Performance Testing**. [S.l.]. 2014. (NHTSA-2014-0022).

AUER, A.; FEESE, S.; LOCKWOOD, S. **History of Intelligent Transportation Systems**. Intelligent Transportation Systems - Joint Program Office. Washington, DC, p. 56. 2016. (FHWA-JPO-16-329).

AZEVEDO, A. L.; CONTARATO, A.; SANCHES, D. Maio amarelo: Contextualizando as estatísticas de acidentes de trânsito no Brasil. **FGV-DAPP**, 11 Novembro 2019. Disponível em: <<http://dapp.fgv.br/maio-amarelo-contextualizando-estatisticas-de-acidentes-de-transito-no-brasil>>.

CAILEAN, A.-M. et al. **A survey on the usage of DSRC and VLC in communication-based vehicle safety applications**. IEEE 21st Symposium on Communications and Vehicular Technology in the Benelux (SCVT). Delft: Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2014. p. 69-74.

CECCHINI, G. et al. **Performance comparison between IEEE 802.11p and LTE-V2V in-coverage and out-of-coverage for cooperative awareness**. IEEE Vehicular Networking Conference, VNC. Torino: IEEE Computer Society. 2017. p. 109-114.

CHENG, J. et al. Routing in internet of vehicles: A review. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 16, n. 5, p. 2339-2352, 2015. ISSN 10.1109/TITS.2015.2423667.

DOMIN, C. Enabling Safety and Mobility through Connectivity. **SAE International Journal of Passenger Cars - Electronic and Electrical Systems**, v. 3, n. 2, p. 90-98, 2010. ISSN 10.4271/2010-01-2318.

DRESNER, K.; STONE, P. **Mitigating Catastrophic Failure at Intersections of Autonomous Vehicles**. AAMAS Workshop on Agents in Traffic and Transportation. Estoril: [s.n.]. 2008. p. 78-85.

ECKHOFF, D.; SOMMER, C.; DRESSLER, F. **On the Necessity of Accurate IEEE 802.11P Models for IVC Protocol Simulation**. IEEE 75th Vehicular Technology Conference (VTC Spring). Yokohama: Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2012. p. 1-5.

ESTRADA, Z. US set to drop proposed vehicle-to-vehicle communications mandate. **The Verge**, 2017. Disponível em: <<https://www.theverge.com/2017/11/1/16592704/vehicle-to-vehicle-communications-mandate-trump>>. Acesso em: 22 out. 2019.

FCC. **First Report And Order, Further Notice Of Proposed Rulemaking, And Order Of Proposed Modification**. Federal Communication Commission. Washington, D.C., p. 143. 2020. (DA/FCC #: FCC-20-164 Docket/RM: 19-138).

GALLO, L.; HÄRRI, J. **Analytic performance comparison of unsupervised LTE D2D and DSRC in a V2X safety context**. Sophia, p. 44. 2014.

GANDOTRA, P.; JHA, R. K. Device-to-Device Communication in Cellular Networks: A Survey. **Journal of Network and Computer Applications**, v. 71, p. 99-117, Agosto 2016.

GODUTO, J.; DAHNCKE,. Audi launches first Vehicle-to-Infrastructure (V2I) technology in the U.S. starting in Las Vegas. **Audi USA**, 2016. Disponível em: <<https://media.audiusa.com/en-us/releases/92>>. Acesso em: 16 Novembro 2019.

HAMEED MIR, Z.; FILALI, F. LTE and IEEE 802.11p for vehicular networking: a performance evaluation. **EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking**, v. 11, n. 89, p. 1-15, 2014. ISSN 1687149920148. Disponível em: <<http://jwcn.eurasipjournals.com/content/2014/1/89>>.

HARDING, J. et al. **Vehicle-to-vehicle communications: Readiness of V2V technology for application**. Washington, DC. 2014. (DOT HS 812 014).

HARRI, J.; FILALI, F.; BONNET, C. Mobility models for vehicular ad hoc networks: A survey and taxonomy. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 11, n. 4, p. 19-41, 2009. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5343061>>.

HEGEMAN, G.; BROOKHUIS, K.; HOOGENDOORN, S. Opportunities of advanced driver assistance systems towards overtaking. **European Journal of Transport and Infrastructure Research**, v. 5, n. 4, p. 281-296, 2005. ISSN 1567-7141. Disponível em: <<https://journals.open.tudelft.nl/ejtir/article/view/4408>>.

HEGEMAN, G.; BROOKHUIS, K.; HOOGENDOORN, S. Opportunities of advanced driver assistance systems towards overtaking. **European Journal of Transport and Infrastructure Research**, 5, n. 4. 281-296. Disponível em: <<https://journals.open.tudelft.nl/ejtir/article/view/4408>>.

HOFMANN-WELLENHOFHERBERT, B.; LICHTENEGGER, H.; WASLE, E. **GNSS—Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more**. Vienna: Springer, 2008.

IEEE. **IEEE Guide for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Architecture**. [S.I.], p. 1-78. 2014. (IEEE Std 1609.0-2013).

KOMINE, T.; NAKAGAWA, M. Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights. **IEEE Transactions on Consumer Electronics**, v. 50, n. 1, p. 100-107, 2004. ISSN 10.1109/TCE.2004.1277847.

KOTUSEVSKI, G.; HAWICK, K. A. A review of traffic simulation software. **Research Letters in the Information and Mathematical Sciences**, 13, 2009. 35-54.

KRAJZEWICZ, D. et al. Recent Development and Applications of SUMO - Simulation of Urban MObility. **International Journal On Advances in Systems and Measurements**, v. 5 (3&4), p. 128-138, December 2012.

LEBLANC, D.; BELZOWSKI, B. **Interoperability issues for commercial vehicle safety applications**. Washington, DC. 2012. (DOT HS 811 674).

LI, Y. **An Overview of the DSRC/WAVE Technology**. International Conference on Heterogeneous Networking for Quality, Reliability, Security and Robustness. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. 2015. p. 544--558.

LI, Y. et al. Leveraging vehicle connectivity and autonomy to stabilize flow in mixed traffic conditions: accounting for human-driven vehicle driver behavioral heterogeneity and perception-reaction time delay. **arXiv preprint arXiv:2008.04351**, p. 10, 2020.

LI, Z. et al. **Next-generation intersection control algorithm for autonomous vehicles**. Transportation Research Board 92nd Annual Meeting. Washington DC: [s.n.]. 2013. p. 1–21.

LI, Z. et al. Sustainability Effects of Next-Generation Intersection Control for Autonomous Vehicles. **Transport**, v. 30, n. 3, p. 342-352, 2015. Disponivel em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.3846/16484142.2015.1080760>>.

LI, Z.; CHITTURI, M. V.; NOYCE, D. A. **Development of Next Generation Intersection Control**. Washington, DC. 2013. (CFIRE 04-18).

LU, Q.; KIM, K.-D. A genetic algorithm approach for expedited crossing of emergency vehicles in connected and autonomous intersection traffic. **Journal of Advanced Transportation**, 2017. Disponivel em: <<https://www.hindawi.com/journals/jat/2017/7318917/>>.

MAGALHAES, P. et al. Video-assisted overtaking system enabled by C-V2X mode 4 communications. **International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications**, v. 2020-Octob, p. 382-387, 2020. ISSN 9781728197227. Disponivel em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9253375>>.

MICULESCU, D.; KARAMAN, S. Polling-systems-based Autonomous Vehicle Coordination in Traffic Intersections with No Traffic Signals. **IEEE Transactions on Automatic Control**, 65, n. 2, Fevereiro 2020. 680-694. Disponivel em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8732975>>.

MOLINA, C. B. S. T. et al. **A Comparison of Two Simulators to Support Safety Analysis in Autonomous Vehicles**. The 2nd International Conference on

Engineering Sciences and Technologies. Portoroz, Eslovênia: Taylor & Francis Group. 2017. p. 273.

MOTRO, M. et al. Vehicular ad-hoc network simulations of overtaking maneuvers on two-lane rural highways. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 72, p. 60-76, 2016. ISSN 10.1016/j.trc.2016.09.006.

MOUSAVI, H. et al. LTE physical layer: Performance analysis and evaluation. **Applied Computing and Informatics**, 15, 2019. 34-44. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210832717301990>>.

NHTSA. **Vehicle-to-Vehicle Communication Technology for Light Vehicles**. National Highway Traffic Safety Administration. Washington, DC, p. 377. 2016. (DOT HS 812 359).

OLSSON, M. et al. EPS Network Entities and Interfaces. In: OLSSON, M., et al. **EPC and 4G Packet Networks - Driving the Mobile Broadband Revolution**. 2ª. ed. Waltham, MA, EUA: Academic Press (Elsevier), 2013. Cap. 15, p. 365-429. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/book/9780123945952/epc-and-4g-packet-networks>>.

SAE INTERNATIONAL. **Taxonomy and definitions for terms related to on-road automated motor vehicles**. Warrendale. 2018. (J3016_201806).

SCHLIENZ, J.; ROESSLER, A. **Device to Device Communication in LTE**. Munich. 2016.

SEWALKAR, P.; SEITZ, J. Vehicle-to-Pedestrian Communication for Vulnerable Road Users: Survey, Design Considerations, and Challenges. **Sensors**, Basel, Switzerland, v. 19, n. 2, p. 358, 17 Janeiro 2019.

SILVA, T. A. et al. **A preliminary analysis of impacts of vehicular ad hoc networks on traffic safety**. European Safety and Reliability Conference (ESREL). Portoroz, Eslovênia: Taylor & Francis Group. 2017. p. 2503-2508.

SLOVICK, M. Toyota, Lexus Commit to DSRC V2X Starting in 2021. **Innovation Destination Automotive**, 2018. Disponível em: <<https://innovation-destination.com/2018/05/16/toyota-lexus-commit-to-dsrc-v2x-starting-in-2021/>>. Acesso em: 16 Novembro 2019.

SOMMER, C. **Veins**, 2019. Disponível em: <<http://veins.car2x.org/documentation>>. Acesso em: 9 Janeiro 2019.

SONG, H. et al. Control/User Plane Decoupled Architecture Utilizing Unlicensed Bands in LTE Systems. **IEEE Wireless Communications**, 24, Outubro 2017. 132-142. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8088540>>.

SUN, W. et al. **D2D-based V2V communications with latency and reliability constraints**. IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). Austin: Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2014. p. 1414-1419.

VISMARI, L. F. et al. **A simulation-based safety analysis framework for autonomous vehicles—assessing impacts on road transport system's safety and efficiency**. European Safety and Reliability Conference (ESREL). Trondheim, Norway: CRC Press. 2018. p. 2067-2075.

VUKADINOVIC, V. et al. 3GPP C-V2X and IEEE 802.11p for Vehicle-to-Vehicle communications in highway platooning scenarios. **Ad Hoc Networks**, v. 74, p. 17-29, 2018. ISSN 1570-8705.

WU, X. et al. Vehicular Communications Using DSRC: Challenges, Enhancements, and Evolution. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, 31, n. 9, Setembro 2013. 399-408. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6550885>>.

WU, X. et al. Vehicular communications using DSRC: Challenges, enhancements, and evolution. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 31, n. 9, p. 399-408, 2013. ISSN 07338716. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/6550885>>.

YAO, Y. et al. **Delay analysis and study of IEEE 802.11p based DSRC safety communication in a highway environment**. Turin: IEEE INFOCOM. 2013. p. 1591-1599.

YIN, J. et al. **Performance evaluation of safety applications over DSRC vehicular ad hoc networks**. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery. 2004. p. 1-9.

YUE, P.; WU, L.; CUI, Z. **Integrating LTE-D2D and VLC techniques to support V2V communication**. IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). Qingdao: Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2017. p. 1-6.