



Universidade de Brasília

Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Ciência da Computação

Uma Simulação para Sistemas de Gerenciamento do Tráfego com Tratamento do Clima

Pablo Xavier Barbosa da Silva

Monografia apresentada como requisito parcial
para conclusão do Bacharelado em Ciência da Computação

Orientador

Prof. Dr. Marcelo Antonio Marotta

Brasília
2019

Dedicatória

Esse trabalho é dedicado aos meus pais.

Agradecimentos

Eu gostaria de agradecer a todas as pessoas impressionantes que me ajudaram a chegar até aqui, e que não foram poucas. Com esse trabalho eu espero poder construir o melhor de mim com tudo o de maravilhoso que vi em cada um de vocês. Em particular, eu agradeço aos meus pais por seu exemplo de perseverança e generosidade sem igual. Agradeço também ao Prof. Dr. Marcelo Antonio Marotta e aos outros professores dedicados do departamento de Ciência da Computação que contribuíram para o meu crescimento. Que toda a ética e o esforço que me foram transmitidos possam nunca me falhar.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), por meio do Acesso ao Portal de Periódicos.

Resumo

O desenvolvimento de capacidades de cooperação entre veículos conectados (CV) é indispensável para o futuro de transportes terrestres sobre redes viárias com infraestruturas cada vez mais populadas e inteligentes. O conhecimento de métodos de previsão de tráfego e de estratégias de controle de trânsito é essencial no desenvolvimento de aplicações que auxiliem os condutores em seus percursos diários. Em geral o clima afeta o trânsito criando efeitos adversos sobre a via, tais como redução da visibilidade, diminuição da fricção do pavimento, bem como ameaça ao desempenho do veículo (*e.g.*, tração, estabilidade e manobrabilidade). O uso de ferramentas de simulação é a melhor maneira de se tratar alterações repentinas nas condições da rede viária devido ao surgimento de eventos de precipitação extrema. Contudo, a maioria das soluções de Sistema de Gerenciamento de Tráfego (SGT) atuais não consideram os efeitos das condições adversas de tempo. Nesse contexto, o trabalho presente estuda os impactos de eventos de precipitação extrema sobre o fluxo regular de veículos num cenário urbano típico. É proposto um mecanismo de ocorrência de eventos de precipitação para um SGT completamente distribuído e baseado em *Vehicle ad hoc Networks* (VANET). Resultados da simulação mostraram que mesmo para uma situação restrita de chuva forte, quando comparada ao registro original de mobilidade dos veículos (OVMT), apresentam um aumento drástico na variabilidade dos dados relativos a mensagens duplicadas, número de mensagens recebidas e tempo de espera acumulado. O estudo pretende ajudar na compreensão das necessidades na disciplina de SGT com Tratamento do Clima (WRTM) para fornecer alertas de segurança a veículos autônomos e conectados (CAV).

Palavras-chave: comunicações interveiculares, simulação climática, congestionamentos de tráfego, precipitação extrema, veículos conectados e autônomos

Abstract

The development of cooperation capabilities between connected vehicles (CV) seems to be indispensable for the future of land-based transports over road networks with increasingly more populated and intelligent infrastructures. The knowledge around methods of traffic prediction and transit control strategies is essential in the development of applications which aim to aid drivers in their daily routes. Generally, weather impacts the transit by generating adverse effects on the roads, like reduced visibility, decreasing pavement friction, as well as influencing driver behaviour and threatening vehicle performance (*e.g.*, traction, stability, maneuverability). The use of simulation tools is the best way to address sudden changes in the road network conditions due to the emergence of inclement weather. In this context, the present work studies the impacts of extreme precipitation events on regular vehicle flow in a typical urban scenario. A mechanism of precipitation occurrence is proposed for a fully-distributed and VANET-based Traffic Management System (TMS). Simulation results shows that, even for the occasion of a constricted heavy rain, when compared to the original vehicle mobility trace (OVMT), presents a drastic increase in the variability of the data related to duplicated messages, total messages received and accumulated waiting travel time. The research intends to be helpfull in understanding Weather-Responsive Traffic Management System (WRTMS) needs for the offering of safety alerts to connected and automated vehicles (CAV).

Keywords: inter-vehicular communications, weather simulation, traffic congestion, extreme precipitation, connected and autonomous vehicles

Sumário

1	Introdução	1
2	Fundamentação Teórica	5
2.1	Precipitação Extrema	5
2.2	Impactos do Clima no Tráfego	6
2.3	Comunicações Interveiculares	8
2.4	Simulações de Tráfego	10
2.4.1	Classes de Simulações	11
2.5	Ferramentas de Simulação	12
2.5.1	OMNeT++	12
2.5.2	INET	13
2.5.3	Veins	13
2.5.4	SUMO	14
3	Trabalhos Relacionados	17
4	Proposta de Solução	28
4.1	Simulação do FASTER	29
4.2	Modelo de Mobilidade	29
4.3	Mecanismo de Ocorrência de Eventos de Precipitação	31
4.4	Implementação	32
5	Análise e Resultados	34
5.1	Acumulado de Mensagens Duplicadas	35
5.2	Tempo de Espera Acumulado	36
5.3	Total de Mensagens Recebidas	37
6	Conclusão e Trabalhos Futuros	39
	Referências	41

Lista de Figuras

4.1	Componentes de um nó veicular para um carro conectado.	28
4.2	A rede viária abstrata é gerada com a aplicação NETGENERATE. Em azul, a área sob precipitação extrema.	30
4.3	Uma máquina de estados com três estados que descrevem a alteração na velocidade do veículo.	31
4.4	Atrás, a interface gráfica Qtenv com suporte a execução de simulação interativa, animação, inspeção e debug. Na frente, a simulação microscópica com a interface gráfica SUMO-GUI.	33
5.1	Acumulado de mensagens duplicadas por cenário de 20, 100 e 300 carros, com a ausência e a presença do efeito de chuva.	35
5.2	Tempo de espera acumulado por cenário de 20, 100 e 300 carros, com a ausência e a presença do efeito de chuva.	36
5.3	Total de mensagens recebidas por <i>broadcast</i> por cenário de 20, 100 e 300 carros, com a ausência e a presença do efeito de chuva.	37

Lista de Tabelas

5.1 Parâmetros do cenário de rede viária	34
--	----

Lista de Abreviaturas e Siglas

API *Application Programming Interfaces.*

C-V2X *Cellular Vehicle-to-Everything Communications.*

CAV *Connected and Autonomous Vehicles.*

CGT *Centro de Gerenciamento de Tráfego.*

CV *Connected Vehicles.*

DLR *German Aerospace Center.*

DSRC *Dedicated Short-Range Communications.*

FASTER *Fully-distributed Traffic Management System to Improve the Overall Traffic Efficiency.*

GIS *Geographic Information System.*

GPU *Graphics Processing Unit.*

IEEE *Institute of Electrical and Electronics Engineers.*

INET *Internet Networking.*

INMET *Instituto Nacional de Meteorologia.*

IVC *inter-vehicular communications.*

LGPL *GNU Lesser General Public License.*

LTE *Long Term Evolution.*

MAC *Media Access Control.*

MANET *Mobile ad hoc Networks.*

MBS *Mensagens Básicas de Segurança.*

OMNeT++ *Objective Modular Network Testbed in C++.*

OVMT *Original Vehicle Mobility Traffic.*

PANDDORA *Preventing Traffic Congestion with a Distributed Data Dissemination and Re-Routing Algorithm.*

R2V *Roadside-to-Vehicle Communications.*

SGT *Sistema de Gerenciamento de Tráfego.*

SMA *Sensores de Magnetorresistência Anisotrópica.*

STI *Sistema de Transportes Inteligente.*

SUMO *Simulation of Urban Mobility.*

TCP *Transmission Control Protocol.*

TraCI *Traffic Control Interface.*

V2C *Vehicle-to-Cloud Communications.*

V2H *Vehicle-to-Home Communications.*

V2I *Vehicle-to-Infrastructure Communications.*

V2P *Vehicle-to-Pedestrian Communications.*

V2V *Vehicle-to-Vehicle Communications.*

V2X *Vehicle-to-Everything Communications.*

VANET *Vehicular ad hoc Networks.*

VANT *veículo aéreo não tripulado.*

Veins *Vehicles in Network Simulation.*

VLC *Visible Light Communication.*

WAVE *Wireless Access in Vehicular Environments.*

Wi-Fi *Wireless Fidelity.*

WIMAX *Worldwide Interoperability for Microwave Access.*

WLAN *Wireless Local Area Network.*

WRTM *Weather-Responsive Traffic Management.*

Capítulo 1

Introdução

Em grandes centros urbanos o crescimento populacional contínuo conduz o aumento também do número de veículos nas vias. Sem uma infraestrutura de ruas e estradas que acompanhe esse crescimento, os congestionamentos e outros problemas de trânsito se tornam uma questão cada vez mais frequente na vida das pessoas. Esses problemas prejudicam o deslocamento nas cidades, com efeitos diretos sobre a qualidade de vida e bem-estar das pessoas. Buscando dirimir essa situação, Cidades Inteligentes [1] fazem uso de Sistemas de Gerenciamento de Tráfego (SGTs), que implementam estratégias de engenharia de trânsito para melhorar a eficiência da mobilidade urbana, reduzindo os impactos econômicos e ao meio-ambiente.

Ao mesmo tempo em que a segurança no transporte se tornou uma questão central para governos e fabricantes de automóveis nos últimos anos, os avanços nas tecnologias de rede sem fio levaram à introdução de serviços que fazem uso das altas capacidades de transmissão e mobilidade. Tecnologias de rede sem fio penetraram o mercado inicialmente sob dois modos principais [2]: sistemas celulares, para comunicações sobre uma área geográfica extensa, e redes locais (Wireless Local Area Networks – WLANs), para ambientes internos. Atualmente, o uso de WLANs com velocidades mais altas para usos em ambientes externos de alta mobilidade tem sido investigado.

Além disso, as novas gerações de veículos autônomos e conectados (Connected and Automated Vehicles – CAVs) implementam aplicações de segurança que requerem que os veículos troquem informações em tempo real e permaneçam conectados, cooperando entre si. Sistema de Transportes Inteligente (STI) [3][4] são aplicações de sensoriamento, análise, controle e tecnologias de comunicação para transportes terrestres que buscam prover segurança, mobilidade e eficiência. STIs incluem uma ampla gama de projetos que processam e compartilham informações para reduzir congestionamentos, melhorar o gerenciamento de tráfego, minimizar o impacto ambiental e aumentar os benefícios dos transportes a usuários comerciais e ao público em geral. Eles podem ser implementados independentemente, na forma de comunicação de veículo para veículo, *Vehicle-to-Vehicle Communications* (V2V), ou atrelados a uma infraestrut-

tura viária, na forma de comunicação de veículo para infraestrutura, *Vehicle-to-Infrastructure Communications* (V2I).

A detecção e alerta de condições adversas de direção podem ajudar a reduzir o número de fatalidades e casualidades no trânsito. As condições adversas de trânsito referem-se à presença de elementos estranhos (pedestres, animais, galhos) na via e a determinadas ocasiões (feriados, eventos, passeatas). As condições adversas de vias incluem estado de conservação da via, largura, existência de acostamento, desvios, quantidade de veículos, trechos escorregadios, obras na pista, etc. As condições adversas de tempo referem-se à ocorrência de fenômenos da natureza que dificultam a visibilidade e tornam o pavimento liso, prejudicando a capacidade do motorista de conduzir o veículo. Elas incluem a chuva, neve, granizo, vento, neblina, etc. Outras condições adversas de direção são condições adversas de luz, veículo e condutor.

As condições climáticas são influenciadas por ciclos sazonais, mudanças atmosféricas e variações de temperatura. Normalmente elas não modificam elementos do trânsito ou agem diretamente sobre os veículos, mas atuam sobre as condições da via. Assim, o estado do tempo influi na mobilidade através da redução de visibilidade, intensidade de precipitação, força do vento e variação de temperatura, além de causar a redução do coeficiente de fricção do pavimento, ameaça à performance do veículo, redução da estabilidade e manobrabilidade do veículo e danificar a integridade da infraestrutura viária. Como consequências adicionais há o aumento do risco de acidentes, alteração do fluxo de tráfego e impacto na produtividade das pessoas.

Em vias urbanas, más condições climáticas sozinhas são responsáveis por até 15% das causas de congestionamentos de trânsito [5]. Muitas regiões têm implementado estratégias de prevenção de congestionamentos inovadoras e pesquisadores de diferentes áreas têm sido atraídos para desenvolver SGTs [6] que lidem com isso. SGTs integram informação, comunicação e tecnologias de sensoriamento para coletar dados relacionados ao tráfego a partir de fontes heterogêneas, tais como veículos [7], semáforos, sensores da via, pedestres, etc.

Uma forma mais acessível de avaliar as condições de trânsito sob diferentes estratégias de controle de tráfego é utilizando simulações, mesmo em situações onde essas condições mudam significativamente devido às más condições climáticas, acidentes de carros, trechos em obras e outros casos atípicos [8]. Embora inicialmente possa se presumir que o tráfego pode ser descrito por horários de partida e de chegada, e rotas com uma duração bem definida, ele é majoritariamente condicionado pelo desejo de um indivíduo por mobilidade [9], e exatamente por isso nem horários de partida e de chegada, nem rotas fixas são conhecidos previamente. O trânsito de veículos particulares, em especial, torna impossível modelar o tráfego com o uso de fórmulas matemáticas. Esse ponto constitui um grande problema para a modelagem de tráfego em si.

Tanto os desejos de um cidadão de partir e chegar em determinados lugares, em determinados momentos, como o movimento de veículos nas ruas influenciam o tráfego, ao mesmo tempo

em que esse influencia aqueles. A capacidade produtiva da rede viária depende dos horários de partida dos condutores e determina a velocidade do movimento. Ao mesmo tempo em que a capacidade afeta os horários de partida do condutor à medida em que eles desejam se mover mais rápido e chegar num determinado lugar num certo momento. Na tarefa de melhorar a eficiência do tráfego é necessário um modelo válido com o qual se trabalhar. Devido à impossibilidade de criar um modelo de fluxo perfeito, dada sua alta complexidade e organização caótica, resultando num comportamento variado, a simulação é a única forma de tentar prever o tráfego [9].

SGTs implementam uma variedade de estratégias para melhorar a segurança, mobilidade e produtividade nas vias. Entre as funções que podem ser realizadas estão o controle de semáforos, controle de fluxo de tráfego, detecção e gerenciamento de incidentes e congestionamentos, e disseminação de informação de viagem. Na disciplina de Gerenciamento de Tráfego com Tratamento do Clima, *Weather-Responsive Traffic Management (WRTM)* [10], eventos climáticos e seus impactos podem ser vistos como incidentes previsíveis, não recorrentes que contribuem para o congestionamento ao reduzir a capacidade da via. Como resultado disso, há a necessidade de pesquisadores compreenderem como o clima afeta as estradas e o tráfego, bem como as vantagens e desvantagens de cada estratégia, a fim de se mitigar os efeitos de climas severos.

Assim como com qualquer incidente, busca-se prever ou detectar um evento climático, identificar a natureza do evento (*e.g.*, intensidade, área de efeito, evolução) e gerenciar o tráfego sob condições piores que ótimas. À medida que mais STIs são implementados, sistemas de gerenciamento se tornam uma das ferramentas vitais para operadores em Centros de Gerenciamento de Tráfego (CGT). No esforço para avançar o estado da prática em SGTs que tratam o clima, melhores ferramentas de análise, modelos e soluções integradas devem ser investigadas. Esses trabalhos representam passos importantes em direção a um gerenciamento de tráfego holístico na era dos CAVs.

O objetivo principal desse trabalho é adaptar uma proposta de simulação de SGT conceituada na literatura para incluir a ocorrência de eventos de precipitação atmosférica, e em seguida realizar um estudo dos efeitos climáticos sobre uma rede viária urbana e no fluxo de veículos conectados.

Para cumprir o objetivo principal, esse trabalho tem os seguintes objetivos específicos:

- Modelar um cenário urbano com infraestrutura V2V e ocorrência de eventos de precipitação atmosférica;
- Adaptar uma simulação de um sistema de gerenciamento de tráfego distribuído adicionando mecanismo de ocorrência de precipitações;
- Executar a simulação sob condição de alerta meteorológico para diferentes densidades de tráfego;

- Analisar os resultados da eficiência geral do tráfego de veículos e da confiabilidade da rede de comunicação.

Essa monografia está organizada em seis capítulos. No Capítulo 2, são apresentados os conceitos básicos como a visão geral de STIs, as definições de SGTs e de precipitação extrema. O Capítulo 3 traz o estado da arte de alguns SGTs existentes e outros trabalhos relevantes relacionados. No Capítulo 4, a proposta é apresentada em termos de uma simulação para um cenário de mobilidade urbano sob condição climática adversa. Além disso, a implementação da solução na forma de protótipo e as adaptações feitas sobre um SGT completamente distribuído são apresentadas. O Capítulo 5 exibe a análise dos resultados obtidos através da execução das simulações para diferentes densidade de veículos. Por último, são apresentadas as conclusões e os trabalhos futuros.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

Este capítulo apresenta a fundamentação dos principais pontos que conceituam pesquisa e desenvolvimento em SGT com tratamento do clima. As relações entre elementos de eventos de precipitação atmosférica são apresentadas e seus efeitos sobre a rede viária de transportes descritas. Além disso, são introduzidas as tecnologias por trás das comunicações interveiculares – do inglês, *inter-vehicular communications* (IVC) – e simuladores de tráfego. Por fim, são detalhadas as ferramentas utilizadas nesse trabalho.

2.1 Precipitação Extrema

As mudanças climáticas causadas pelo aquecimento global têm tornado a ocorrência de eventos climáticos extremos cada vez mais intensos e frequentes. No ano passado, o hemisfério norte foi marcado por uma cadeia de catástrofes climáticas sem precedentes: inundações no Japão, ondas de calor na América do Norte, Europa e Ásia, incêndios florestais nos Estados Unidos, Canadá, Grécia e até mesmo em partes do Ártico.

Essas transformações são consistentes com o que modelos climáticos nos dizem ser esperado a medida em que continuamos a aumentar a concentração de gases de efeito estufa na atmosfera, resultantes da queima de combustíveis fósseis. Segundo Michael Mann [11], professor em Ciência Atmosférica da Universidade da Pennsylvania, eventos climáticos extremos podem ficar de 50% a 200% mais frequentes até 2100 se as condições de emissões futuras não melhorarem.

Em setembro de 2017, o furacão Harvey, de categoria 4, provocou níveis recordes de chuva e levou a inundações devastadoras em regiões densamente populadas em Houston, nos Estados Unidos [12]. Notavelmente, têm-se sugerido que os efeitos da urbanização em precipitações extremas induzidas por temporais e inundações devam ser mais explicitamente incluídos em modelos de mudanças climáticas [13].

No Rio de Janeiro, em abril desse ano, ocorreu a maior chuva dos últimos 22 anos [14][15][16], provocando alagamentos e deslizamentos em várias localidades. Na ocasião a cidade declarou estágio de crise e foram registradas ao menos 10 mortes, além de desabrigados e desalojados. Segundo o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) [17], a região registrou aumento médio de temperatura de 1,5 a 2°C nos últimos 100 anos.

A realização de previsão de chuvas é uma tarefa mais difícil que a previsão de temperaturas. A taxa de aumento da umidade atmosférica fornece um ponto de partida, mas o quadro completo é mais detalhado devido às relações complexas entre fatores como precipitação, circulação atmosférica, umidade e aquecimento.

A decisão sobre qual definição de precipitação extrema [18] utilizar é importante quando informações de mudança climática são repassadas a outras áreas de conhecimento. Explicações anteriores sugeriam que a ocorrência de eventos de precipitação extrema eram diretamente proporcionais ao aumento de umidade na atmosfera. Hoje, essa visão é entendida como excessivamente simplista. A incerteza quanto às mudanças em precipitação extrema é maior para eventos mais extremos, particularmente nos trópicos. À exemplo, estudos comparativos sobre o furacão Harvey constataram que na ocasião do evento a intensidade de precipitação aumentou mais que o aumento da umidade.

Alguns estudos explicitamente consideram como a definição de precipitação extrema afeta sua taxa de mudança com o aquecimento atmosférico, outros não. Outros mecanismos que também influenciam a ocorrência de precipitações são circulação atmosférica, estabilidade atmosférica e liberação de calor latente.

Existem muitas formas de se definir precipitação extrema e cada uma delas é afetada diferentemente por mudanças na umidade e na circulação. A maneira como a definimos afeta as conclusões que obtemos sobre sua variação. Apesar disso, é possível observar que eventos de precipitação moderada mudam mais lentamente que a taxa de aumento da umidade na atmosfera, enquanto que eventos mais extremos podem aumentar na mesma medida, ou acima, que a taxa de aumento de umidade atmosférica.

A definição de precipitação extrema aqui utilizada é restringida a eventos de chuva com índices de precipitação acima de 60mm/h, ou 100mm/dia, com riscos reais de alagamento, deslizamento de encostas, transbordamento de rios – em cidades com tais áreas de risco –, e grande probabilidade de danos à propriedades e acidentes com risco para a integridade física ou mesmo vida humana [19].

2.2 Impactos do Clima no Tráfego

O clima impacta no tráfego ao reduzir a visibilidade, diminuir a fricção do pavimento, influenciando o comportamento do condutor e ameaçando a performance do veículo (*e.g.*, tração,

estabilidade, manobrabilidade). Durante climas severos, os motoristas aumentam a distância de seguimento, diminuem taxas de aceleração e reduzem a velocidade. O clima impacta na mobilidade ao aumentar o tempo de espera, gerar volumes e velocidades de tráfego menores, aumentar a variância e reduzir a capacidade da via. Efeitos do clima na segurança incluem elevação da frequência de colisões e da severidade com que elas ocorrem.

A seguir são listados alguns dos impactos [20] de eventos de precipitação nas vias e no tráfego interessantes ao gerenciamento do trânsito:

Impactos na via:

- visibilidade reduzida;
- fricção do pavimento reduzida;
- obstrução da faixa e submersão;
- performance do veículo reduzida;
- danos à infraestrutura.

Impactos nas operações de tráfego:

- capacidade da via reduzida;
- velocidades reduzidas e aumento do tempo de espera;
- aumento na variabilidade da velocidade;
- aumento do risco de acidentes;
- restrições de via/pontes e fechamentos.

21% das colisões de veículo no período de um ano ocorrem sob condições de clima adverso [21] (*i.e.*, chuva, neve, granizo, vendavais, nevoeiro ou rajadas de areia ou detritos). Desses acidentes, 15% causam vítimas fatais, 19% são com ferimentos e 22% resultam em danos apenas à propriedade. A vasta maioria das colisões relacionadas ao clima acontecem em pavimento molhado (70%) e durante a chuva (46%), enquanto que 16% das colisões acontecem em pavimento com neve ou lama.

Em vias arteriais, clima adverso pode ter um impacto na efetividade do planejamento de tempos de semáforos. Parâmetros de planejamento do tempo para condições normais podem não ser ótimos sob condições inclementes. As reduções de velocidade podem variar em 10-25% em pavimento molhado e 30-40% em pavimento com lama. Volumes de tráfego arterial podem cair em 15-30%, segundo as condições climáticas e hora do dia. As reduções na taxa de saturação podem variar em 2-21%. O atraso no tempo de viagem pode aumentar em 11-50% e o tempo de partida em semáforos pode aumentar em 5-10%, segundo a severidade do evento.

Nas rodovias, eventos de chuva leve ou moderada podem reduzir a velocidade média em 3-13%, enquanto que eventos de chuva forte podem reduzir em 3-16%, com queda nas variações de 25%. Taxas de fluxo máximas podem cair em 5-10% durante chuvas leves e 14% durante chuvas fortes. A velocidade em condições de trânsito livre pode ser reduzida em 2-13% durante chuva leve e 6-17% durante chuva forte. Condições de baixa visibilidade podem causar reduções de velocidade de 10-12%. Eventos de chuva leve podem reduzir a capacidade da rodovia em 4-11%, enquanto que eventos de chuva forte podem reduzir em 10-30%. Essa redução é de 12% em condições de baixa visibilidade.

As reduções na capacidade podem ser causadas por inundações e obstrução da via devido a condições perigosas (quedas de árvores, caminhões tombados, perda de controle do veículo seguida de colisão).

2.3 Comunicações Interveiculares

Segundo definido na Diretiva 2010/40/EU da União Européia [3], Sistemas Transportes Inteligentes são aplicações avançadas que buscam prover serviços inovadores relacionados a diferentes modos de transporte e gerência de tráfego, permitindo aos usuários estarem melhor informados e realizar um uso mais seguro, coordenado e inteligente das redes de transportes. STI [4] integra telecomunicações, eletrônica e tecnologias da informação com engenharia de transportes, a fim de planejar, projetar, operar, manter e gerenciar sistemas de transporte.

A aplicação de tecnologias de informação e comunicação no setor de transportes rodoviários, e suas interfaces com outros modos de transporte, contribuirão de forma significativa à melhoria do desempenho ambiental, à eficiência (incluindo eficiência energética), segurança física e conforto do transporte rodoviário (incluindo o transporte de cargas e produtos perigosos, segurança pública, mobilidade de passageiros e serviços comerciais), ao mesmo tempo em que assegura a funcionalidade do mercado interno, bem como níveis elevados de competitividade e emprego.

Comunicações interveiculares são, inicialmente, classificadas em dois tipos:

1. *Vehicle-to-Vehicle Communications (V2V) / Vehicular ad hoc Networks (VANET)*:

Uma comunicação veicular do tipo veículo para veículo explora características de uma rede *ad hoc*. Os nós veiculares se comunicam com outros nós que estão dentro do seu alcance de transmissão sem a necessidade dos serviços de um servidor central. Esse modo é ainda frequentemente referido como VANET [22], na qual a comunicação entre nós veiculares é regulada por diferentes algoritmos de roteamento e protocolos [23].

2. *Roadside-to-Vehicle (R2V) / Vehicle-to-Infrastructure Communications (V2I)*:

O outro tipo de comunicação veicular é a comunicação de infraestrutura viária para veí-

culo, a qual se adequa aos princípios de infraestrutura de redes. Comunicações R2V também podem ser encontradas referidas como comunicação veículo para infraestrutura (V2I). Em comunicações R2V, os veículos se comunicam com a infraestrutura viária (*e.g.*, estações base, pontos de acesso, semáforos inteligentes) para enviar ou receber informações.

Outras tecnologias-chave a serem utilizadas nessa área são as tecnologias de comunicações entre veículo e pedestre – *Vehicle-to-Pedestrian Communications* (V2P) –, veículo e nuvem – *Vehicle-to-Cloud Communications* (V2C) – e veículo e residência – *Vehicle-to-Home Communications* (V2H). Coletivamente, as categorias são referidas apenas como comunicações veiculares para quaisquer outros equipamentos, *Vehicle-to-Everything Communications* (V2X) [24] [25].

A implementação bem sucedida de V2V e V2I resultará na redução significativa do número de colisões já num futuro muito próximo, desde que tecnologias de suporte à direção irão alertar o motorista com antecedência para situações de risco elevado, aumentando o tempo de reação na prevenção de acidentes. A exemplo, aplicações em V2V incluem alertas de troca de faixas na pista, alertas de pontos cegos no campo de visão do condutor, radar de assistência em pontos de cruzamento e intersecções, alertas de ultrapassagem perigosa, assistentes de realização de curvas e manobragem, alerta de aproximação com risco de colisão, etc. Enquanto que aplicações em V2I incluem alertas para veículos longos, balanças para veículos pesados, alerta de velocidade excessiva em curva, alerta de sinal vermelho em semáforos, alerta de zonas de redução de velocidade e sistemas de relatos por cidadãos.

Acerca da infraestrutura para essas aplicações, redes de comunicações veiculares *ad hoc* (VANET) são tecnologias desenvolvidas especificamente para aplicações em V2V. Tratam-se de uma subclasse das comunicações móveis *ad hoc* (MANET), as quais compõem uma parte fundamental dos STI. Entre as tecnologias de comunicação associadas à VANET estão as tecnologias de comunicação sem fio que incluem sistemas celulares, *Wireless Fidelity* (Wi-Fi) e *Dedicated Short-Range Communications* (DSRC). DSRC é uma tecnologia *ad hoc* para carros conectados e pontos de acesso, desenvolvida com base no padrão IEEE 802.11p [26].

A *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) padronizou as WLAN como redes 802.11x. A primeira dessa série foi a 802.11b, introduzida no fim dos anos 90. Após o seu sucesso, a IEEE padronizou as variações voltadas para diferentes propósitos [2]. Com o crescente interesse em explorar redes 802.11 em ambientes veiculares, a IEEE veio a padronizar a 802.11p, *Wireless Access in Vehicular Environments* (WAVE), para apoiar a troca de informações entre os veículos e entre veículos e infraestrutura viária. Outra família de tecnologias para a cobertura de grandes áreas é a 802.16x, *Worldwide Interoperability for Microwave Access* (WIMAX). Tais tecnologias têm sido intensamente exploradas e entre as maiores preocupações quanto ao seu uso temos que as vantagens e desvantagens de diferentes propostas e a indeci-

são de seus papéis sobre cada funcionalidade tem dificultado o processo de consolidação dos padrões e regulamentações [27].

Sistema de Gerenciamento de Tráfego (SGT) [6] são plataformas que fornecem serviços inovadores necessários na melhoria da utilização da infraestrutura de transportes, coletando dados que descrevem os padrões de tráfego (densidade, velocidade, tempo de viagem, movimentações dos veículos) para a disseminação de informações através de uma VANET. As limitações das infraestruturas de transporte existentes levam a formações de congestionamentos, responsáveis pelo aumento do tempo de viagem. A melhoria da eficiência do tráfego durante congestionamentos é um problema socialmente relevante e uma área de pesquisa desafiadora devido à complexidade da rede de transportes sendo monitorada por esses sistemas.

Uma das consequências mais críticas dos congestionamentos de tráfego é o impacto nas operações de serviços de emergência [28] (médicos, bombeiros, operações de resgate e polícia), tais serviços demandam respostas eficientes e rápidas com o uso de veículos de emergência. O que torna esses veículos peças centrais nas medidas de resposta também a cenários de catástrofes climáticas.

Veículos conectados, do inglês *Connected Vehicles* (CV) [29], são definidos como veículos com acesso à internet, equipados com um conjunto de sensores e câmeras, e que permitem a comunicação com outros veículos, infraestruturas e outras entidades de rede, por meio da mesma infraestrutura. No futuro, espera-se que veículos conectados sejam comparáveis a dispositivos computacionais inteligentes sobre rodas [2]. Veículos conectados habilitados com capacidades de SGT com tratamento do clima aprimoram a conectividade para melhorar ferramentas e processos de estratégias para mitigar desafios de mobilidade e segurança durante climas adversos.

Um veículo conectado pode transmitir e receber Mensagens Básicas de Segurança (MBS) [30] utilizando comunicações em STI. Nos próximos anos há a expectativa de que governos aprovem regulamentações que requeiram que todos os veículos sejam equipados com dispositivos compatíveis com tecnologia DSRC [31] e *Cellular Vehicle-to-Everything Communications* (C-V2X) [32]. Até lá, o caminho para a utilização efetiva de tecnologias CV demandam novas capacitações, parcerias e acordos, bem como a melhoria das ferramentas existentes. Quatro fases sucessivas para a implantação de CV relacionam planejamento, desenvolvimento conceitual, *design* de sistemas e desenvolvimento, e operações e atividades de manutenção [33].

2.4 Simulações de Tráfego

Na análise de desempenho e exploração de redes de computadores, cabeadas ou sem fio, três técnicas básicas são utilizadas: ambiente de testes, métodos analíticos e simulação computacional. A construção de um ambiente físico de testes para cenários de redes é em geral onerosa, extenuante e restringe a experimentação às especificidades da montagem. Com métodos ana-

líticos busca-se a uma solução para as questões por meio de densas técnicas de análise matemática, com condições iniciais e um conjunto de parâmetros bem definidos – é uma técnica tão abrangente e detalhada quanto complexa e demorosa. Uma simulação reproduz tanto o comportamento de nós de uma rede como dos canais de comunicação, fornecendo um ambiente virtual e auxiliando o desenvolvedor a observar uma diversidade de funcionalidades sobre uma rede arbitrária.

Em sentido amplo, uma simulação é uma técnica de imitação do comportamento de um sistema existente ou imaginado, em totalidade ou em parte. Particularmente aplicada no *design* de redes de comunicação, a simulação permite explorar o comportamento geral, padrões de tráfego, capacidade de transmissão, etc. O objetivo de uma simulação é reproduzir uma situação do mundo real, da maneira mais aproximada da realidade o possível, a fim de se obter resultados fidedignos, reproduzíveis e configuráveis. O funcionamento dos mecanismos na simulação é de natureza representativa, permitindo um ensaio segundo o que seria esperado como resultado da experiência original. Em contrapartida, o termo “emulação” é comumente empregado na designação de um “sistema realista”, no sentido de que este poderia ser diretamente aplicado – em todo ou em parte – na ocasião de um cenário real sem perda de funcionalidades. Ferramentas de simulação são usadas a fim de auxiliar o trabalho de *design* de sistemas pequenos ou extensos.

Um simulador de redes é uma ferramenta de software que simula as condições existentes numa rede real, permitindo o desenvolvimento e teste de novos protocolos de rede. Em substituição ao método analítico, nas situações onde este não é apropriado, métodos de simulação são principalmente usados na análise de desempenho de um sistema, devido ao baixo custo associado, simplicidade de implementação e praticidade no teste de redes de larga escala. Pesquisadores e desenvolvedores de redes devem sempre utilizar ferramentas de simulação confiáveis, que permitam análise estatística e disponham de flexibilidade, de modo que outros pesquisadores possam verificar de forma independente a autenticidade dos resultados obtidos. Além disso, deve-se destacar que o modelo simulado deve ser o mais próximo possível do real.

2.4.1 Classes de Simulações

Do ponto de vista de implementação, uma simulação pode ser classificada sob diferentes normas. Estamos aqui interessados especificamente nas seguintes classes [34]:

Simulação de evento discreto: Numa simulação de evento discreto todas as alterações significativas ao estado do sistema são registradas como eventos distintos que ocorrem em momentos específicos. Cada evento é tratado individualmente e a sucessão dos eventos descreve o comportamento esperado para o modelo. Desse modo, os eventos são organizados de acordo com o tempo e o simulador realiza a triagem dos eventos em filas, com base no instante em que ocorrem. A leitura das filas é feita ordenadamente, novos eventos podem ir sendo adicionados às filas à medida que os eventos presentes vão sendo executados.

Simulação baseada em agentes: Um modelo de simulação baseado em agentes é um caso particular de modelos de simulação de evento discreto. Enquanto que num modelo tradicional de evento discreto as entidades possuem apenas atributos, num modelo de simulação baseado em agentes os agentes possuem tanto atributos como métodos.

Simulação de evento contínuo: De forma contrária à simulação discreta, numa simulação contínua as alterações ocorrem de forma gradativa dentro de um intervalo e o progresso completo é registrado.

Simulação local: O modelo de simulação é dito local se é executado numa rede interconectada ou numa máquina individual. O modelo de simulação é dito distribuído se se encontra espalhado entre vários *hosts*, isto é, executando numa rede de computadores interconectados através da internet.

2.5 Ferramentas de Simulação

O ambiente de simulação é composto pelo framework de simulação de redes OMNeT++, pelo framework de comunicações veiculares Veins e pelo simulador de tráfego microscópico SUMO. Logo abaixo, segue uma descrição de cada uma dessas ferramentas.

2.5.1 OMNeT++

Apesar de frequentemente ser referido como um simulador de redes, o *Objective Modular Network Testbed in C++* (OMNeT++) [35] trata-se na verdade de um *framework* de simulação, modular e orientado a objetos, para pesquisa e desenvolvimento de sistemas distribuídos complexos. Ele fornece a infraestrutura e as ferramentas para escrever simulações.

Um dos seus fundamentos principais é a arquitetura genérica de componentes. Os modelos são montados a partir de componentes reutilizáveis chamados módulos. Estes se conectam por meio de portas (*gates*), podendo ser combinados para formar módulos compostos. Quando bem escritos, eles podem ser reutilizados e combinados de várias formas, como blocos de LEGO. Os módulos podem conter parâmetros, úteis na personalização do comportamento do módulo e na definição da topologia do modelo.

A comunicação entre os módulos ocorre através da troca de mensagens, as quais podem conter estruturas de dados arbitrárias. As mensagens são repassadas ao longo de caminhos pré-definidos, por meio de portas e conexões, ou enviadas diretamente aos seus destinos. Na base da hierarquia se encontram os módulos simples, escritos em C++. Toda a flexibilidade e poder da linguagem de programação podem ser utilizados, com o apoio da biblioteca de classes de simulação.

O kernel de simulação fornece suporte à estrutura e modelos de parametrização, realiza o escalonamento de eventos, adiciona e controla números aleatórios, coleta resultados estatísticos, apoia gráficos e animações, entre outras funções.

No OMNeT++ as simulações podem ser executadas sob diferentes interfaces. As interfaces gráficas são úteis em propósitos de demonstração e depuração, enquanto que as interfaces de linha de comando são melhores para fins de execuções em lote. O ambiente de execução gráfico nativo, Qtenv, suporta animações 2D/3D e permite a exploração do estado interno do modelo durante a execução.

Enquanto muitos simuladores de redes possuem uma arquitetura razoavelmente fixa para representar os nós de simulação, o OMNeT++ traz uma arquitetura de componentes genérica e deixa para o projetista do modelo decidir como mapear conceitos tais como nós e interfaces de redes, protocolos e aplicações para componentes de modelos.

As simulações podem ser executadas em paralelo e distribuídas, utilizando mecanismos de comunicação entre as partições tais como MPI ou *named pipe*. O algoritmo de simulação paralela pode ser facilmente estendido ou conectado a outros novos. Os modelos não necessitam de nenhuma instrumentação especial para rodar em paralelo, sendo apenas necessárias configurações mínimas.

OMNeT++ é livre para uso acadêmico e sem fins lucrativos. Todo o sistema é absolutamente portátil entre os sistemas operacionais mais comuns (Linux, Mac OS/X, Windows).

2.5.2 INET

Um dos *frameworks* mais populares e úteis desenvolvido para o OMNeT++ é o *Internet Networking* (INET) [36], que fornece protocolos, agentes, e outros modelos para se trabalhar com redes de comunicação. Ele é particularmente usado com destaque no projeto e validação de novos protocolos. Diversos outros *frameworks* de simulação se baseiam no INET e o estendem em direções distintas, como por exemplo redes veiculares.

2.5.3 Veins

Vehicles in Network Simulation (Veins) [37] é uma biblioteca de modelos para comunicações veiculares que utiliza componentes do INET e se baseia na co-simulação com um simulador de tráfego rodoviário terceirizado. De código aberto, é livre para baixar, adaptar e utilizar.

Veins se consolidou no domínio de Redes Veiculares *ad hoc* e STI. Utilizado tanto pelas universidades como pela indústria no mundo todo, o framework contribuiu para o processo de padronização de comunicações interveiculares, do inglês *inter-vehicular communications* (IVC).

A biblioteca inclui uma pilha completa de modelos de simulação para investigar a comunicação de veículos e infraestrutura. Em especial, contém um modelo sofisticado de componentes da camada *Media Access Control* (MAC) IEEE 802.11, utilizado por padrões como WAVE, ETSI ITS-G5 e ARIB T-109.

Por sua característica modular, é aplicado ainda como a base para a modelagem de outros nós móveis tais como pedestres, ciclistas, trens, veículo aéreo não tripulado (VANT). Ou ainda para outras tecnologias de comunicação como *Long Term Evolution* (LTE) *mobile broadband* e *Visible Light Communication* (VLC).

Os modelos são executados pelo OMNeT++ enquanto interagem com o simulador de tráfego rodoviário SUMO. Outros componentes do Veins realizam a configuração, execução e monitoração da simulação. O OMNeT++ e o SUMO são conectados via um *socket* do tipo *Transmission Control Protocol* (TCP), para o qual foi padronizado um protocolo *Traffic Control Interface* (TraCI). Isso possibilita uma simulação bidirecionalmente acoplada entre o tráfego viário e a comunicação na rede. Um nó no OMNeT++ equivale a um veículo no simulador de tráfego SUMO.

O *framework* de simulação pode tanto ser utilizado sem modificações, com apenas alguns ajustes de parâmetros para casos de uso específicos, como servir de ambiente de execução para o código escrito pelo usuário. Nesse sentido, o código do usuário deverá ser uma aplicação a ser avaliada por outros meios de simulação, enquanto o *framework* fica responsável pela modelagem das camadas de protocolo de nível mais baixo e pela mobilidade dos nós – cuidando da configuração da simulação, assegurando sua correta execução e coletando os resultados.

Por ser de código aberto, qualquer simulação realizada por meio do Veins pode ser compartilhada. Não apenas em seus resultados, mas em toda a cadeia de ferramentas necessárias para reproduzir os mesmos resultados e verificar como eles foram obtidos.

2.5.4 SUMO

Simulation of Urban Mobility (SUMO) [38] é uma suíte de simulação de tráfego microscópico, contínuo, de código aberto, altamente portátil, projetado para manipular redes viárias, que permite a modelagem de sistemas de tráfego multi-modais (incluindo veículos, pedestres e transportes públicos). O projeto do SUMO iniciou em 2000, tendo como a principal motivação para o seu desenvolvimento apoiar a comunidade de pesquisa de tráfego com uma ferramenta capaz de implementar e avaliar algoritmos robustos. Ao desenvolver o simulador, o *German Aerospace Center* (DLR) buscou disponibilizar uma arquitetura base comum para tornar a implementação de algoritmos mais comparável e permitir a contribuição adicional de outros pesquisadores. Com ele é possível simular como uma certa demanda de tráfego, que consiste de unidades de veículos, se move através de uma dada rede viária. Por ser puramente microscópico, cada veículo é modelado explicitamente, possui uma rota própria e se move independentemente através

da rede. As simulações são determinísticas por padrão, mas há diversas opções para introduzir aleatoriedade.

SUMO pode simular redes viárias de médio a grande porte, em cidades, áreas urbanas, auto-estradas e vias expressas. Nesses cenários, ele simula o movimento de veículos nas vias, como carros, caminhões, motocicletas, bicicletas, pedestres e trens. Ele pode executar uma ampla gama de modelos de mobilidade (desde modelos discretos com faixas, idealizados, a modelos com sub-faixas, de trânsito misto), um conjunto de diferentes controladores de interseções (desde o simples direito à passagem, aos semáforos acionados por demanda), e uma ampla gama de formatos de entrada para redes viárias (desde o OpenStreetMap [39] e o TIGER, aos formatos proprietários e profissionais como o *Geographic Information System* (GIS)).

O simulador permite abordar um grande conjunto de tópicos de gerenciamento de tráfego. Mas a ferramenta não precisa considerar todos os pontos necessários à obtenção de uma simulação de tráfego completa. Isto é, implementação ou configuração de métodos para tratar redes viárias, demanda e controle de tráfego. Isso porque junto ao pacote SUMO, há uma riqueza de ferramentas de suporte utilizadas para importar e preparar a rede viária, demandar dados para serem usados no SUMO, tratar tarefas como escolha de rota e re-roteamento, avaliação de semáforos, visualização e monitoramento, cálculo de emissões, simulação de comunicações veiculares e previsão de tráfego.

O projeto SUMO foi criado com o intuito de atender a dois critérios principais: o *software* deve ser rápido, e portátil. Devido a isso, as versões iniciais eram desenvolvidas para executar exclusivamente a partir da linha de comando, sem a utilização de uma interface gráfica e com todos os parâmetros inseridos manualmente. Essa característica visa aumentar a velocidade de execução ao eliminar todo o processamento associado a uma exibição lenta. Além disso, o *software* deve ser separado em várias partes, com cada um delas voltada a um propósito específico e executadas separadamente. Esse ponto é que torna o SUMO completamente diferente de outras suítes, onde, por exemplo, a atribuição dinâmica do usuário é realizada dentro do próprio simulador e não via uma aplicação externa como no SUMO. Também por isso, SUMO permite o uso de estruturas de dados mais rápidas. Cada qual ajustada ao propósito atual, em vez de utilizar outras mais complexas e pesadas.

Assim, SUMO pode ser facilmente aprimorado com modelos personalizados e oferece diversas *Application Programming Interfaces* (API) de controle remoto da simulação. Como mencionado, o *framework* Veins não inclui modelos de mobilidade de veículos em vias. Ao invés disso, ele estabelece uma conexão com um simulador de tráfego viário que executa como um processo separado. O Veins pode, então, se beneficiar diretamente de projetos de pesquisa elaborados por especialistas da área com ferramentas completas para a simulação de tráfego rodoviário. Originalmente, o SUMO é o simulador de tráfego viário com o qual Veins foi designado a interoperar, mas isso não impede que qualquer outro simulador compatível com a

interface de acoplamento TraCI possa ser utilizado. A execução do OMNeT++ é pausada enquanto o SUMO computa a informação de mobilidade para um momento desejado no tempo. Por padrão, a informação de mobilidade é levantada junto ao SUMO em intervalos fixos (*e.g.*, 100ms), apesar de um levantamento adaptativo ser suportado pela interface.

Durante a simulação do deslocamento de um nó móvel no SUMO, no momento da partida, o Veins cria um módulo de simulação dedicado no OMNeT++. A medida que o nó se movimenta, o Veins mantém o correspondente módulo no OMNeT++ atualizado com sua posição, direção, e velocidade (junto com o estado das setas de direção e outros dados associados). Analogamente, no momento da chegada de um nó móvel ao seu destino, Veins remove o módulo correspondente, no OMNeT++, da simulação. Assim é feita a acoplação da mobilidade de nós entre o OMNeT++ e o SUMO. Tal acoplamento é dito bidirecional: simultaneamente à evolução da simulação no OMNeT++, segundo ditado pela simulação no SUMO, o tráfego viário no SUMO pode ser influenciado pelo OMNeT++. Por exemplo, quando os carros selecionam uma rota diferente até o seu destino, em resposta à informação de tráfego recebida, ou quando os carros realizam uma freagem de emergência em resposta a um alerta recebido.

O campo de pesquisa acerca de simulações de estratégias e operações de tráfego associados a STIs é recente, mas já conta com uma comunidade dedicada a efusivos debates com a intenção de se desenvolver tecnologias seguras e bem fundamentadas, construindo uma base de comunicação completa para uma sociedade mais conectada e dinâmica [40][41]. Na seção seguinte são levantados trabalhos que contribuem nesse propósito e auxiliam na compreensão dos passos envolvidos nas aplicações de comunicações interveiculares.

Capítulo 3

Trabalhos Relacionados

Diversos projetos de pesquisa estudaram os efeitos do clima sobre a rede viária e na mobilidade de veículos. Este capítulo apresenta uma relação de trabalhos publicados sobre SGT e outros assuntos relacionados. Em especial, destaca-se a contribuição de conceitos e tecnologias originais em ciência da computação, como a simulação de tráfego em larga escala e redes neurais profundas.

Em Songhua Hu *et al.* [42], os autores examinam o impacto da chuva em 45 trechos de inundação urbana na cidade de Shenzhen, na China, de maio a setembro de 2017. Sendo 23 dos trechos em vias arteriais e 22 em vias secundárias. Os efeitos da chuva e da inundação induzida por chuva são quantificados para comparar a velocidade e o volume dos trechos sob condições sem chuva, com chuva e com inundação. Os resultados do artigo fornecem informações valiosas para STIs que são úteis no desenvolvimento de estratégias de planejamento e gerenciamento de risco sob condições de chuva e inundação.

Poucos estudos anteriores abordaram a relação entre tráfego e inundação exclusivamente. A principal razão é a dependência dos outros estudos de dados do clima provenientes de estações atmosféricas, que carecem de informação sobre as condições da superfície da via. A literatura existente sobre inundação e tráfego adota principalmente simulação hidrológica para especular trechos de inundação.

O problema da inundação induzida por chuva é particularmente recorrente em países em desenvolvimento devido às capacidades insuficientes de drenagem e área crescente de superfície impermeável. Inundações graves podem levar à interrupção parcial da via e até mesmo ameaçar a segurança do condutor.

A chuva possui diversos efeitos no trânsito. Primeiro, a chuva diminui a visibilidade do motorista e reduz o coeficiente de fricção do pavimento, resultando em quedas significativas na velocidade do tráfego, volume da via e capacidade de serviço. Em segundo lugar, a chuva tem um impacto direto na demanda de viagem. Algumas viagens podem ser adiadas ou encurtadas, ou redefinidas por rotas alternativas para evitar trechos intransitáveis, o que por sua vez pode levar

à mudança significativa na distribuição do fluxo de tráfego da rede. A chuva forte levanta ainda o problema da inundação. Os autores tratam separadamente inundação e chuva. Chuva que gera inundação é excluída das categorias regulares de chuva. Da mesma forma, chuva refere-se exclusivamente a chuva sem inundação.

O estudo examina parte da área central da cidade de Shenzhen, na China, com uma população de 3,7 milhões e cobrindo uma área de 343km^2 . Devido à influência das monções e ao desenvolvimento urbano concentrado, a estação das chuvas em Shenzhen apresenta um alto risco de inundações.

Dados de tráfego, incluindo a velocidade e o volume, são recuperados de 203 Sensores de Magnetorresistência Anisotrópica (SMA) com uma agregação de 5 minutos. Dados de fins de semana e feriados são excluídos, já que seus padrões de viagem são significativamente diferentes dos dias úteis. Dados do clima como precipitação, umidade, visibilidade, velocidade do vento e temperatura, são detectados por 152 estações meteorológicas atmosféricas. A mesma agregação de 5 minutos é utilizada. Os autores afirmam que as informações relativas à inundação não puderam ser adquiridas de forma automatizada, porque não havia equipamento de detecção de inundação na região de estudo. Assim, os dados relativos à inundação foram coletados através da mineração em redes sociais. Dos 256 trechos de inundação verificados, 45 foram escolhidos como melhor apropriados por conterem SMA e estações meteorológicas adjacentes.

Após a aquisição de todos os dados requeridos, os dados de tráfego e clima de cada trecho de inundação são sincronizados. A observação dos registros de chuva mensal acumulada, de maio a setembro, indica que a chuva é um fenômeno local em Shenzhen e pode variar significativamente sob uma pequena área geográfica. Os 45 trechos são selecionados com base numa distância de 3km ao redor de cada estação meteorológicas.

Dado que a magnitude do efeito da chuva sobre o tráfego é extremamente intrínseco à classe da via, os impactos são analisados separadamente para 23 avenidas arteriais e 22 ruas secundárias. A natureza do tráfego também se altera segundo a hora do dia, de modo que se aplica uma divisão em intervalos de meia hora para agrupar distribuições acumuladas semelhantes.

Dos resultados é possível notar que os períodos noturnos (21h-7h30) apresentam distribuições mais discrepantes. Isso acontece porque o tamanho das amostras são pequenas nessa parte do dia, afetando a variabilidade inerente dos dados de tráfego. Logo, é razoável excluir tais períodos da análise. Os períodos são então concentrados em três categorias: AM (7h30-9h30), INTER (9h30-17h, 19h-21h) e PM (17h-19h). Para efeitos de comparação com outros resultados da literatura, eventos de chuva são separados em três categorias: chuva leve ($< 0,01\text{in./hr.}$), chuva moderada ($0,01 - 0,25\text{in./hr.}$) e chuva forte ($> 0,25\text{in./hr.}$) – não inclusas chuvas que causam inundação. O volume de tráfego é padronizado para uma única faixa, eliminando o potencial impacto de múltiplas faixas na via.

Dos resultados obtidos algumas conclusões podem ser estabelecidas. Chuva pode causar quedas na velocidade e no volume das vias, e as variações nas reduções estão associadas à intensidade da chuva. Reduções na velocidade durante horários de pico são, em geral, maiores que reduções fora de horários de pico – visto que o impacto da chuva na velocidade aumenta com o aumento do volume de tráfego. Por outro lado, quedas no volume fora dos horários de pico são sempre maiores que durante horários de pico – isso porque horários de pico apresentam prevalência de viagens entre casa e trabalho.

Reduções tanto em velocidade como em volume ao longo das vias arteriais são, em geral, maiores que em vias secundárias – a razão se deve à maior vulnerabilidade das vias arteriais sob climas severos, já que estas se encontram sob maior pressão de tráfego. As diferenças de velocidade e volume, ao longo de duas classes de vias de tráfego urbano, e sob quatro categorias de chuva são calculadas. Uma redução de 1,2 – 18,4% é verificada nas velocidades durante clima chuvoso, enquanto que a redução é de 1,1 – 16,5% no volume durante clima chuvoso. Vias arteriais sofrem maior redução de velocidade (2 – 18,4%) e volume (2 – 16,5%) do que vias secundária (1,2 – 5,3% em velocidade e 1 – 11% em volume). Reduções em velocidade durante horários de pico (2,6 – 28,4%) são, em geral, maiores que fora de horários de pico (1,2 – 8,2%). Ao passo que reduções no volume em horários de pico (1 – 5,3%) são, em geral, menores que fora do horários de pico (2,7 – 16,5%). Além disso um padrão bimodal é observado nas viagens diurnas, com quedas na velocidade no período da manhã (7h30-9h30, 4,4 – 18,4%) levemente maiores que no período do fim da tarde (17h-19h, 4,0 – 17,3%) em vias arteriais. Enquanto que o contrário acontece em vias secundárias – em vias arteriais o volume durante AM é maior que o volume durante PM, com o contrário ocorrendo em vias secundárias.

Na situação em que a chuva induz a formação de inundações a fricção da pavimentação é diminuída drasticamente, podendo até mesmo causar a interrupção do tráfego viário em casos mais graves. Há também um atraso na duração do efeito. A inundação precisa de algum tempo para surgir após o início da chuva, e, após seu término, inundações remanescentes podem persistir por tempo indeterminado.

Os resultados revelam que inundações reduzem velocidade em 21,5 – 24,3% e volume em 15,8 – 31,2%, ambos substancialmente maiores que os valores para a chuva. O impacto da inundação no volume é mais drástico que o da chuva, na medida que este pode causar mesmo a interrupção do tráfego, enquanto que a chuva meramente reduz a demanda por tráfego. O impacto da inundação na velocidade em horários de pico (24,3%) é maior que fora de horários de pico (21,5 – 22,7%), muito embora o impacto da inundação no volume em horários de pico (28,8%) seja menor que fora de horários de pico (25,8 – 31,2%). Em termos de classe da via, os efeitos no tráfego das vias arteriais – 22,7 – 24,3% na velocidade e 28,8 – 31,2% no volume – são maiores do que nas vias secundárias – 21,5% na velocidade e 25,8% no volume – de modo

idêntico às condições de chuva.

Em síntese, os autores concluem que os efeitos climáticos têm grande influência e impacto na mobilidade dos cidadãos da cidade. Com o uso de uma rede V2V ou V2I as influências dos efeitos climáticos podem ser reduzidos e até mesmo dirimidos. Em situações como essas são necessários SGT que se adaptem às condições do tempo, contudo a execução de simulações desses sistemas ainda se encontra num estágio inicial, necessitando de pesquisas que contribuam para o desenvolvimento da área.

Em Allan M. de Souza *et al.* [6], os autores apresentam a visão geral, uma classificação simples, e uma análise qualitativa, além de descrever os desafios e perspectivas futuras na implementação de SGTs. Buscando prevenir congestionamentos de veículos e melhorar a eficiência geral do tráfego, grandes cidades fazem uso dos SGTs. Esses sistemas são compostos de uma série de tecnologias de sensoriamento e processamento, e coletam dados a partir de fontes heterogêneas.

Os dados relacionados ao trânsito podem ser agregados e explorados de maneira cooperativa, entre os veículos, ou por meio de um Centro de Gerenciamento de Tráfego (CGT), concentrado numa nuvem ou num *data center*. Os dois principais modos de comunicação habilitados em SGT são comunicação V2V, em arquiteturas completamente distribuídas e livres de infraestrutura, e comunicação V2I, em arquiteturas baseadas em infraestrutura.

Os autores classificam dezenove propostas de SGTs, organizados segundo a arquitetura de comunicação e objetivos. Em geral, as propostas se concentram em controlar o tráfego, detectando a formação de congestionamentos, a ocorrência de acidentes, sugerindo rotas alternativas e ajustando a velocidade dos veículos. Os sistemas livres de infraestrutura são sete e implementam mecanismos de detecção cooperativa de congestionamentos, prevenção de congestionamentos, detecção de acidentes e alertas de riscos. Os sistemas baseados em infraestrutura são doze e incluem mecanismos de gerenciamento de semáforos, detecção de congestionamento, sugestão de rota e ajuste de velocidade.

Os autores realizam ainda uma análise qualitativa detalhada das propostas, destacando fatores como *design*, objetivos, estratégia de detecção, desafios de rede, estratégia de re-roteamento, sugestão de velocidade e cenário. Como desafios em aberto e perspectivas futuras, os autores apontam a integração de dados de fontes heterogêneas, questões de *big data* e gerenciamento de dados, representação de condições de tráfego e identificação de perigo, direcionamento para rotas alternativa, privacidade e segurança.

As dificuldades na integração de dados de fontes heterogêneas (*e.g.*, veículos, semáforos, sensores viários e internet) estão relacionadas ao grande volume de dados obtidos de sistemas diversos e sem padronização. Nesse ponto, tecnologias emergentes, como Internet das Coisas, devem contribuir na redefinição do paradigma de coleta de dados. Outras dificuldades incluem o rastreamento e gestão dos sistemas envolvidos na integração e a utilização de identificadores

únicos.

O maior desafio apresentado é a representação de condição de trânsito e a identificação de perigos. Seguindo a etapa de exploração, o conhecimento adquirido deve compreender uma representação fidedigna das reais condições de trânsito, já que uma má interpretação nessa etapa pode resultar em falsos positivos. As dificuldades estão relacionadas à priorização de determinados tipos de informações sobre outros e como cada uma delas impactará no trânsito. As propostas de SGT na literatura ainda são ineficientes e apresentam dificuldades na definição dos intervalos para a identificação de perigos em tempo útil, e da informação utilizada nesses processos. Dessa forma, existe a necessidade de testar e realizar o desenvolvimento de simulações com SGT que sejam fidedignas à realidade. Nesse caso, precisa-se de um simulador capaz de apresentar efeitos adversos que prejudicam as condições de trânsito, como os eventos climáticos que ocorrem na realidade. Assim, SGTs podem ser testados antes de serem aplicados em cenários reais, evitando potenciais situações que envolvam prejuízos aos cidadãos.

Paweł Gora [8] apresenta uma ideia para um SGT com uma simulação de tráfego em larga escala, aplicando algoritmos de tomada de decisão baseados em redes neurais profundas e computação em nuvem, utilizando processamento de *big data* e computação em *Graphics Processing Unit* (GPU). As maiores inovações, no entanto, provém do conceito teórico de que o tráfego pode ser predito com uma alta precisão utilizando ferramentas de simulação e aprendizado de máquina, mesmo em situações em que as condições de tráfego mudam significativamente. O comportamento de um motorista humano é normalmente de difícil predição, mas com o advento de carros autônomos que conhecem em detalhes suas futuras rotas, algoritmos de condução e interação com o ambiente, e que podem repassar tais informações para o SGT, a ideia de um trânsito previsível parece se tornar mais próxima. Ter informações adicionais sobre a rota de um carro pode permitir novas oportunidades, como por exemplo saber quantos carros estarão rodando em cada segmento de via e quando. A estimativa pode ser ainda melhor quando apoiada por uma simulação de tráfego precisa.

Os dados adquiridos podem ser utilizados para construir os modelos virtuais de tráfego típico e de tráfego em tempo real, ambos aplicáveis no processo de gerenciamento de tráfego em tempo real. O modelo de tráfego típico contém informações sobre o número de viagens entre quaisquer pares de regiões de comunicação, divididos segundo seus modos de transporte e rotas escolhidas. Tal informação deve estar disponível para cada período de tempo significativo. Períodos de tempo precisos devem ser determinados para uma análise cuidadosa da informação de tráfego disponível. A duração de um único período de tempo normalmente é de 1h, mas em alguns casos períodos de tempo mais curtos podem ser necessários.

Já que muitas viagens são recorrentes num período semanal – as pessoas frequentemente viajam para os mesmos lugares a cada segunda-feira no período de 7-8h –, pode ser suficiente manter um modelo separado para cada hora e para cada dia da semana, resultando em algo como

168 modelos diferentes. Mas o tráfego também é influenciado por feriados e alguns eventos especiais, então na prática pode ser necessário ter muitos mais modelos diferentes. O número exato deve ser determinado para cada área/cidade separadamente, analisando-se o histórico de dados de tráfego disponível.

O importante é determinar todos os modelos de tráfego que correspondem às condições normais e típicas. Na realidade, essas condições típicas podem nunca ocorrer, porque normalmente elas serão a média de muitos casos diferentes, e ruídos introduzido por situações específicas (*e.g.*, trechos em obras, eventos especiais e novos carros) podem causar desvio das condições típicas. Assim, para gerenciar o tráfego apropriadamente, é importante construir também um modelo de tráfego em tempo real.

Um modelo de tráfego em tempo real pode ser construído a partir dos dados coletados de carros em tempo real, incluindo posições, velocidades, rotas pretendidas e modelos de direção. Eles devem ser mais precisos que modelos de tráfego típico, ou seja, devem conter informação sobre número de viagens entre cada par de áreas de comunicação, com relação a diferentes modos de transporte e rotas escolhidas, mas também informação sobre posições atuais, velocidade, e rotas planejadas de todos os veículos participando no tráfego. Muito embora, um modelo de tráfego típico para um certo período pode ser utilizado para aproximar dados faltantes.

Modelo de tráfego em tempo real pode ser utilizado para executar previsões de tráfego rápidas, *e.g.*, baseado-se em simulação de tráfego ou em algoritmos de aprendizado de máquina. Tais previsões devem executar uma vez a cada dado período de tempo ($1min$) para prever o estado do tráfego com antecedência ($10min$ a frente). Eles podem servir para detectar condições indesejadas de tráfego e realizar decisões sobre executar ou não algoritmos de otimização de tráfego e encontrar melhores estratégias de controle de tráfego.

O aspecto mais importante da ideia proposta de um SGT baseado em simulação, é que a qualidade das diferentes estratégias de controle de tráfego podem ser avaliadas utilizando-se simulação de tráfego na qual a entrada é construída com base num modelo de tráfego de tempo real e em parâmetros da estratégia. Por exemplo, no caso da designação do tempo de semáforos, esses parâmetros podem ser intervalos entre sinais verdes e duração das fases. No caso de designação de rotas, o que está relacionado ao sistema de informação do viajante, podem ser as rotas propostas aos condutores/CAVs.

O espaço de estratégias possíveis de controle de tráfego é normalmente muito grande e com frequência não há um método fácil para encontrar a melhor estratégia possível num dado conjunto – em alguns casos prova-se que esse problema é NP-difícil. Apesar disso, avaliar um grande número de estratégias diferentes utilizando simulação de tráfego pode dar importantes noções sobre como pesquisar por uma boa estratégia (sub-ótima) num grande conjunto de estratégias possíveis. Por exemplo, pode-se aplicar meta-heurísticas, tais como algoritmos genéticos.

O processo de otimização necessário para avaliar um grande número de estratégias pode ser demorado, requerendo uma grande capacidade computacional, mas também pode ser executado *off-line* – uma vez por semana/mês/ano, para cada modelo. Para um gerenciamento de tráfego em tempo real tal abordagem pode não ser boa, porque cada simulação avaliando a qualidade da estratégia de controle de tráfego pode necessitar de vários minutos e o sistema deve checar um grande número de estratégias possíveis para encontrar uma suficientemente boa.

Apesar disso, o processo pode ser acelerado de duas maneiras:

1. **Acelerando a execução de uma simulação:**

O processo de avaliação da qualidade da configuração do semáforo pode ser feito utilizando qualquer modelo de simulação capaz de computar valores de uma dada função objetivo (*e.g.*, o tempo total da viagem como função das configurações do semáforo).

Para alcançar uma simulação mais rápida que em tempo real, paralelização e poder computacional adicional podem ser necessários. Além disso, pode ser possível distribuir as computações num *cluster* de máquinas, dividindo toda a rede viária em partes menores, e executando as simulações de tráfego de cada região numa máquina separada. Se um único veículo viaja entre pelo menos duas regiões diferentes (esse é um caso típico, pessoas normalmente utilizam automóveis para viajar longas distâncias), isso deve ser tratado apropriadamente.

O tempo de computação pode depender do poder computacional disponível, que pode ser relativamente grande se a simulação precisar ser acelerada em algumas ordens de magnitude (de poucos minutos para poucos segundos). Já que no problema de gerenciamento de tráfego normalmente é necessário avaliar uma grande quantidade de estratégias diferentes (alguns milhões) e executar múltiplas simulações com diferentes configurações, essa abordagem pode precisar de um poder computacional muito grande. Dessa forma, considerar cenários onde efeitos climáticos ocorrem pode aumentar ainda mais a complexidade do processamento, principalmente a computação de congestionamentos e do próprio evento climático.

2. **Aproximando os resultados da simulação:**

Se o processo de gerenciamento de tráfego requer executar um grande número de simulações (alguns poucos milhões ou bilhões) o método descrito acima pode demorar muito. Uma melhor abordagem para reduzir o processamento é obtida a partir de aproximações de saídas da simulação, atingindo uma boa precisão utilizando algoritmos meta-heurísticos e de aprendizado de máquina, por exemplo, redes neurais. O sistema deve executar alguma quantidade de simulações para gerar um conjunto de treinamento para o algoritmo de aprendizado de máquina. Depois, algoritmos de aprendizado de máquina também precisam de algum tempo para treinar o modelo de aproximação. Com o mo-

delo treinado, sua inferência (*i.e.*, aproximações de saídas da simulação para uma dada entrada: a estratégia de controle de tráfego) é muito rápida. Portanto, o método pode ser aplicado *off-line* para construir redes neurais aproximando saídas da simulação, para um modelo de tráfego típico.

Para um gerenciamento de tráfego em tempo real com modelos de tráfego em tempo real, aprendizado de máquina pode ainda ser relativamente difícil e demorado de ser executado. Assim a pesquisa deve seguir pelo menos três direções:

- Executar simulação de tráfego tão rápido quanto possível, para gerar rapidamente um conjunto de treinamento para algoritmos de aprendizado de máquina;
- Treinar algoritmos de aprendizado de máquina tão rápido quanto possível e num conjunto de treinamento tão pequeno quanto possível, ao mesmo tempo em que se assegura precisão e acurácia satisfatória;
- Desenvolver meta-heurísticas (*e.g.*, algoritmos genéticos) capazes de encontrar estratégias de controle de tráfego utilizando um pequeno número de avaliações.

As melhores configurações de controle de tráfego encontradas durante o processo descrito acima devem ser aplicadas a um SGT e enviadas de volta aos veículos (rotas designadas) ou à infraestrutura viária (configurações de semáforo). Nota-se que não é possível assegurar que a estratégia de controle de tráfego encontrada por um algoritmo baseado em modelo de tráfego virtual também será boa no caso de tráfego real. Isso porque podem haver alguns eventos inesperados (*e.g.*, pedestres atravessando a rua) que podem atrapalhar o tráfego de modo que a avaliação baseada num modelo virtual não será boa.

Contudo, nessas ocasiões SGT podem apenas executar o procedimento de otimização de tráfego descrito acima novamente para encontrar uma nova estratégia – essa é uma das vantagens do gerenciamento de tráfego em tempo real. Mas mesmo na ausência de eventos inesperados, a compatibilidade entre o tráfego do mundo real e o modelo de tráfego está sempre restrita até certo ponto. Para o tráfego de CAVs, o SGT pode saber exatamente o algoritmo de condução, de modo que pode incluí-lo num modelo de tráfego em tempo real (ou típico) e simular a condução de cada CAV e suas interações com outros CAVs, que podem dar uma precisão suficiente do modelo de simulação.

O processamento intensivo dos simuladores para testar SGTs é agravado quando são utilizados algoritmos de aprendizado de máquina e meta-heurísticas. Tal processamento tem natureza altamente escalável, principalmente na presença de eventos de climas aleatórios que irão introduzir novos congestionamentos e maior ocorrência de informações. Além disso, os eventos climáticos podem facilmente comprometer a convergência dos algoritmos ao inserir comportamentos inesperados no cenário. Mesmo assim, as simulações devem ser trabalhadas para conter

essas condições adversas a fim de que SGT baseados em aprendizado de máquina possam se adaptar apropriadamente durante situações não previstas.

Allan M. de Souza *et al.* [43] propõem um SGT para resolver o problema de congestionamento de veículos de maneira completamente distribuída, que conta com um mecanismo de agregação do conhecimento local para limitar o envio de mensagens repetidas e evitar a sobrecarga da rede de comunicação. Nesse modelo os veículos são nós móveis, com sensores embutidos, unidades de processamento e interfaces de comunicação sem fio, se comunicando através de uma VANET. Assim, os veículos podem cooperar entre si para gerar e transmitir informações sobre as condições de tráfego em cenários urbanos que não dispõem de uma infraestrutura viária de suporte.

O sistema também trata problemas de rede durante o processo de disseminação de dados, tais como a tempestade de *broadcast* e a resincronização de transmissão, ambos introduzidos pelo protocolo IEEE 802.11p. O desafio central explorado é como fornecer um conhecimento completo sobre as condições de tráfego para todos os veículos sem sobrecarregar os canais de comunicação. No *Fully-distributed Traffic Management System to Improve the Overall Traffic Efficiency* (FASTER) [43] todos os veículos compartilham seu conhecimento local com os vizinhos (*e.g.*, número de carros, velocidade atual e média), de modo que cada veículo pode aumentar seu conhecimento sobre as condições de tráfego.

Para se reduzir os problemas associados ao protocolo IEEE 802.11p, o cenário é dividido em distritos e um mecanismo de agregação de mensagens é aplicado para diminuir os atrasos e aumentar a cobertura. E após a tomada de conhecimento das condições precisas do tráfego no cenário, cada veículo pode detectar ruas congestionadas e evitá-las calculando rotas alternativas.

O sistema se baseia em quatro fases principais.

1. **Coleta de Informação:** Na fase de coleta de informação cada veículo recolhe informação de seus vizinhos disponíveis a um único salto de distância, para construir um conhecimento local sobre as condições de tráfego. Isso é feito através do envio das mensagens de aviso (*beacon message*), contendo a posição atual do veículo e sua velocidade média. Com essas informações cada veículo pode representar, a partir de um grafo, os conjuntos de vértices – ou interseções – e arestas – ou ruas. A cada rua são associadas a velocidade média calculada dos veículos e a indicação sobre se a rua foi coberta completamente ou apenas parcialmente. Às ruas cobertas e sem tráfego, são atribuídas a velocidade máxima permitida.
2. **Agregação de Informação:** A fase de agregação de informação compreende a divisão do cenário em distritos e a agregação do conhecimento local de todos os veículos no mesmo distrito. Um veículo compartilha seu conhecimento local para os veículos vizinhos, a um único salto de distância, utilizando uma mensagem de conhecimento local (*local knowledge message*), contendo todas as ruas cobertas, a velocidade média da via,

e o tipo da rua (completamente ou parcialmente coberta). Quando outro veículo recebe uma mensagem de conhecimento local de um vizinho ele atualiza suas entradas sobre o conhecimento local, criando um conhecimento do distrito.

3. **Disseminação de Informação:** Para ter o conhecimento completo do cenário cada veículo deve receber o conhecimento de todos os k distritos. Para disseminar esse conhecimento FASTER aplica um protocolo de dados multi-salto baseado em atraso, composto por três módulos principais:

- seleção de transmissor;
- supressão de *broadcast*;
- minimização de colisão de pacotes.

Devido ao mecanismo de agregação empregado, todos os veículos dentro do mesmo distrito potencialmente compartilham o mesmo conhecimento do distrito e, nesse caso, uma única transmissão desse conhecimento é suficiente para encaminhá-lo aos outros distritos. O veículo mais próximo do centro do distrito tem a sua transmissão priorizada pelo módulo de seleção de transmissor.

A mensagem de conhecimento do distrito é encaminhada empregando-se um processo multi-salto. O módulo de supressão de *broadcast* trata o problema de tempestade de *broadcast* reduzindo o número de transmissões, atribuindo diferentes atrasos para cada nó e cancelando mensagens duplicadas. Para isso, veículos dentro de uma zona de preferência, uma área onde os veículos estão mais adequados para continuar realizando o encaminhamento, possuem um atraso mais baixo que veículos fora dessa área.

4. **Detecção de Congestionamento:** Depois que um veículo recebe o conhecimento de todos os k distritos, ele cria um conhecimento do cenário, contendo todas as ruas e suas velocidades médias. Cada veículo constrói um grafo baseado no conhecimento do cenário e para cada rua computa seu peso, o qual é modelado para ter valor inversamente proporcional à velocidade média da rua. O veículo pode então classificar as condições de tráfego em cada rua, desde “classe A”, indicando condições tráfego livre, a “classe F”, indicando tráfego muito congestionado. O módulo de detecção de congestionamento se subdivide em duas fases:

- tomada de decisão em tempo real;
- computação de rota alternativa;

Para realizar a detecção de ruas congestionadas cada veículo verifica os pesos de todas as ruas que compõem a sua rota e, dado um certo limite (“classe D”, levemente congestionado), os pesos acima desse valor indicam uma rua congestionada. Caso o veículo

verifique que irá passar por uma rua congestionada, a fase de computação de rota alternativa seleciona uma nova rota para o veículo dentre as muitas possíveis.

A literatura acerca de STIs tem experimentado um considerável número de contribuições nas últimas duas décadas. Em geral, os trabalhos acima têm como foco funcionalidades como o controle de tráfego, detecção da formação de congestionamentos, a ocorrência de acidentes, sugestão de rotas alternativas e ajuste da velocidade dos veículos. Poucas são as propostas que incluem parâmetros associados a mudanças climáticas e condições externas que influenciam o trânsito. Quando presentes, essas condições podem mudar drasticamente as operações viárias, dando lugar a toda uma nova representação do modelo de mobilidade. O estudo a seguir demonstra a adaptação de uma das soluções aqui referidas e lhe acrescenta um evento de clima severo, permitindo uma análise das mudanças de fluxo resultantes.

Capítulo 4

Proposta de Solução

Nesse trabalho, é proposto a inclusão de um evento de precipitação atmosférica sobre uma das soluções de SGT da literatura, o FASTER. O ambiente de simulação descrito na seção 2.5 é o utilizado na implementação da proposta. Ele compreende o *framework* de simulação de redes baseado em eventos discretos OMNeT++, o *framework* de comunicações interveiculares Veins e o simulador de tráfego microscópico contínuo SUMO. Em todos os resultados obtidos no Capítulo 5, as funções do FASTER estão disponíveis para os veículos. O Veins instancia um nó na rede para cada veículo sendo conduzido no SUMO.

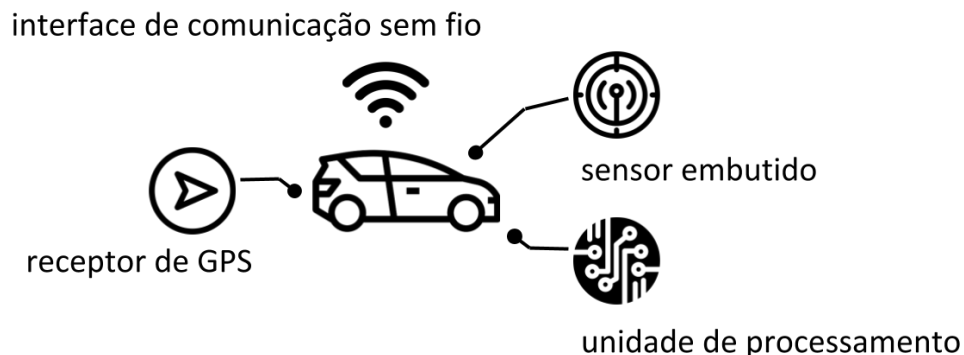


Figura 4.1: Componentes de um nó veicular para um carro conectado.

Um nó móvel, figura 4.1, é representado com sensores embutidos, unidades de processamento e interfaces de comunicação sem fio. Durante a execução do cenário, os nós móveis possuem rotas e direções pré-estabelecidas. Com a ação do SGT, essas rotas são recalculadas para reduzir o tempo total de viagem e evitar situações de congestionamentos.

4.1 Simulação do FASTER

O SGT distribuído e baseado em VANET do artigo apresentado no capítulo 2, FASTER [43], é a solução de STI escolhida para a adaptação. O FASTER faz uso de comunicações V2V baseadas no padrão IEEE 802.11p para coletar informações de tráfego, detectar ruas congestionadas e computar rotas alternativas, tudo com uma baixa carga de processamento.

Para construir um conhecimento geral preciso das condições de tráfego o cenário completo é seccionado por meio de um algoritmo de agrupamento *k-means*. Cada veículo constrói seu conhecimento local e o compartilha com veículos vizinhos, através de mensagens de *beacon*, dentro do mesmo distrito. O conhecimento sobre o distrito contém todas as ruas que o compõem acompanhadas de suas respectivas velocidades médias.

Um robusto protocolo de disseminação de dados multi-salto e baseado em atraso é utilizado para disseminar o conhecimento entre os k distritos. O veículo mais ao centro é escolhido para transmitir seu conhecimento e um módulo de supressão de *broadcast* determina zonas preferenciais, onde outros veículos estarão mais aptos a retransmitir o conhecimento do distrito. Um mecanismo de dessincronização é então aplicado para minimizar a colisão de pacotes introduzida pelo padrão IEEE 802.11p, consequentemente reduzindo a sobrecarga do sistema.

Ao receber todo o conhecimento sobre todos os distritos, cada veículo constrói um grafo $G = (V, E)$, onde V é o conjunto de interseções e E é o conjunto de ruas conectando as interseções, para representar o mapa. Cada aresta possui um peso, usado para classificar as condições de tráfego na rua e modelado para ser inversamente proporcional às respectivas velocidades médias. Assim, cada veículo é responsável por detectar formações de congestionamentos e calcular uma nova rota, através do algoritmo de k -menores caminhos – essa extensão do algoritmo de Dijkstra é escolhida para evitar o desencadeamento de novos congestionamentos em outras áreas.

Os resultados obtidos no artigo[43] indicam que o FASTER é eficiente em cenários urbanos, produzindo um balanceamento de tráfego mais adequado que outras soluções. Dessa forma, a inserção de um evento climático impactará negativamente no desempenho da ferramenta. Isto é, mesmo um SGT robusto da literatura como o FASTER, terá seus resultados e convergência de desempenho comprometidos quando um evento climático inesperado ocorre.

4.2 Modelo de Mobilidade

Enquanto hoje, os dados sobre redes viárias e as posições de edifícios são facilmente encontrados em bases de dados abertas na internet, informações sobre a demanda de tráfego através das vias, intervalos de fases de semáforos, ou meta-dados como horários de ônibus e trens são bem mais difíceis de se obter [44]. O ambiente de tráfego aqui empregado conta apenas com car-

ros conectados que percorrem rotas pré-determinadas num cenário urbano simplificado. Esse mapa deve evidenciar os fatores da formação de congestionamentos, bem como o efeito de agravamento sob a condição adversa, para melhorar a observação do fenômeno – sem a presença de elementos de controle de tráfego que interfiram no fluxo, tais como semáforos, rotatórias e rodízio de placas.

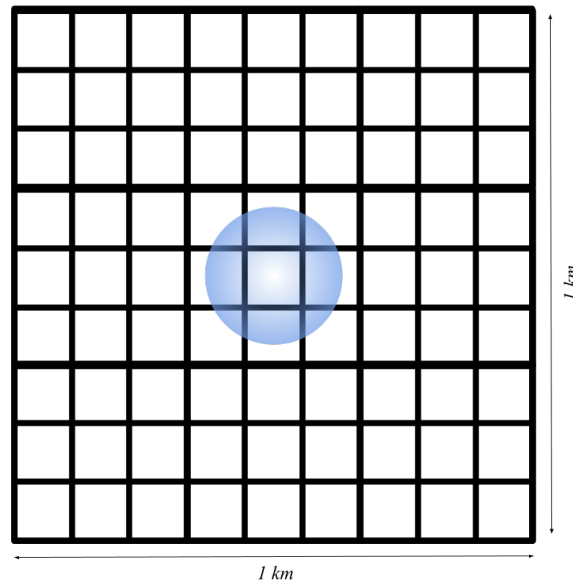


Figura 4.2: A rede viária abstrata é gerada com a aplicação NETGENERATE. Em azul, a área sob precipitação extrema.

O modelo de mobilidade escolhido foi o *Manhattan Grid* [45], figura 4.2, o qual modela uma rede de ruas perpendiculares baseado numa topologia em grade, com duas faixas, uma em cada direção, cada uma com $3,5m$ de largura. Nesse modelo, os nós se movem em direções horizontais ou verticais, percorrendo um ambiente completo de $1km^2$, com 9×9 blocos de edifícios, realizando viagens entre dois pontos: origem e destino.

Uma rede sem fio distribuída é formada entre os veículos para a disseminação de informações de tráfego [46]. A densidade de veículos por simulação é definida para números reduzidos, devido às restrições de capacidade computacional: 20, 100 e 300 veículos. Eventualmente um acidente pode ocorrer em uma das vias, dando início a um congestionamento. As informações sobre a atualização dos pesos das ruas são disseminadas entre os veículos através da VANET. Os carros que contém vias congestionadas no restante dos seus caminhos devem então recalculer novas rotas até seus destinos, com base no conhecimento de cenário adquirido.

4.3 Mecanismo de Ocorrência de Eventos de Precipitação

A modificação realizada no cenário é a criação um mecanismo de ocorrência de eventos de precipitação atmosférica. Para representar essa situação, um perímetro circular de raio igual a $100m$, a partir de um ponto central escolhido é estabelecido durante um dado intervalo de tempo. A chuva deve ter o efeito de reduzir a velocidade dos veículos sob cobertura em 30%. Esse valor corresponde à atitude de precaução dos condutores e CAVs que, diante do surgimento da condição climática adversa, devem reduzir a velocidade dos veículos de modo a atender às recomendações de segurança de direção. Ao deixar a área de precipitação os veículos podem retomar a velocidade máxima da via.

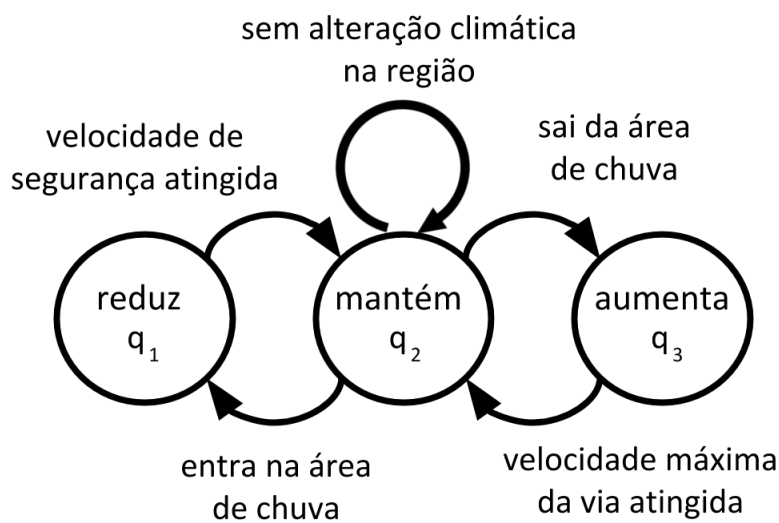


Figura 4.3: Uma máquina de estados com três estados que descrevem a alteração na velocidade do veículo.

Na figura 4.3, o sistema de tomada de decisão dos condutores e CAVs sobre a velocidade do veículo é representado por meio de uma máquina de estados finitos determinística, simulando uma lógica sequencial.

É esperado que a área de precipitação atmosférica criada repentinamente gere dificuldades no cumprimento do percurso dos veículos. Ao aumentar a duração da passagem por essa região, os veículos devem encontrar um maior número de incidentes, formações de congestionamentos, atrasos, variância na qualidade de sinal e outros problemas. Os veículos devem ainda recalcular suas rotas com uma frequência bem maior, interpretativamente, buscando caminhos que desviem de possíveis zonas de torrentes, inundações e ruas bloqueadas. Note que a alteração se dá apenas nas condições da via, as condições de tráfego permanecem as mesmas.

O fator climático deve ser tratado como uma variável a mais no cenário, acrescentando-lhe no critério de realismo. Em especial, a taxa de redução na velocidade dos veículos, 30%, cor-

responde à formação de um evento de precipitação extrema, um cenário de catástrofe climática estabelecida. Em geral, nessas condições, são registradas situações de inundações, quedas de árvores, ventos fortes, deslizamentos de encostas e transbordamento de rios, com grande probabilidade de danos às propriedades e ocorrência de acidentes, com riscos para a integridade física ou mesmo à vida humana.

Uma tempestade assim é classificada como nível de alerta vermelho (muito perigoso) pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A chuva, por si só, não deve influir no número de acidentes de trânsito. Isso porque as condições adversas de condução sozinhas dificilmente causam um acidente, esses aparecem frequentemente associados a uma falha humana. Daí a importância da geração de alertas de segurança e da implementação de capacidades autônomas para os veículos que expandam as capacidades cognitivas do condutor humano.

4.4 Implementação

Entre as dificuldades encontradas no desenvolvimento do mecanismo de precipitação, tem-se que a característica de simulação discretizada, com eventos independentes, do OMNeT++ deve ser considerada na escrita do algoritmo. Um *framework* discreto contém três estruturas centrais: variáveis de estado do modelo de simulação, uma lista de eventos com registro de tempo e um relógio global [47]. Durante a execução da simulação, o escalonador continuamente remove o evento com o menor tempo da fila de eventos. Enquanto é feito o tratamento dos eventos chamados, outros eventos podem ser adicionados ou removidos à fila.

A ordem da invocação dos eventos é essencial para a manipulação correta das variáveis de estado, do contrário ocorre o que chamamos de violação causal. Ao realizar o modelo estrito de execução, o simulador de redes sequencial previne esse tipo de violação. Ainda assim, há o desafio de estender o modelo para o suporte a execuções paralelas, já que nesse caso as violações causais podem ocorrer mais frequentemente. *Frameworks* de simulação paralela normalmente empregam uma variedade de algoritmos de sincronização na tentativa de resolver esse problema.

Logo, no simulador do FASTER, implementado na versão do *Preventing Traffic Congestion with a Distributed Data Dissemination and Re-Routing Algorithm* (PANDDORA), só é possível garantir que as ações sejam executadas na ordem cronológica adequada através do monitoração das variáveis de estado. Essas devem ser modificadas por meio da execução por turnos dos eventos – no OMNeT++ os eventos realizam suas ações por meio do envio de mensagens. Outra característica relacionada à implementação se refere a como o tratamento dos veículos é realizado. No PANDDORA, todas as instâncias de veículos compartilham as mesmas funções, de maneira que cada veículo é responsável por verificar as condições da via. Assim, na escrita do mecanismo de precipitação, deve ser implementada uma verificação interna ao veículo, a fim de que ele próprio identifique se se encontra numa zona de chuva. O mecanismo de sincronismo

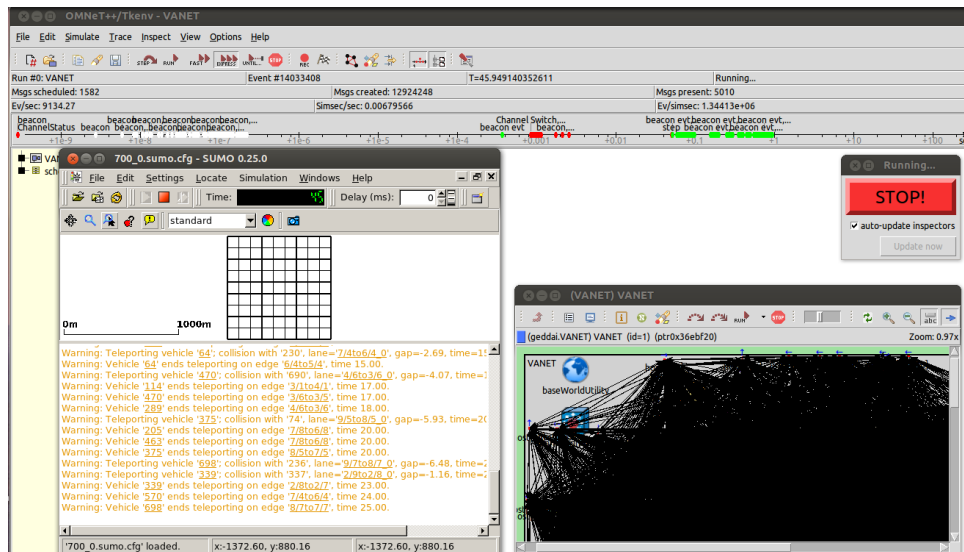


Figura 4.4: Atrás, a interface gráfica Tkenv com suporte a execução de simulação interativa, animação, inspeção e debug. Na frente, a simulação microscópica com a interface gráfica SUMO-GUI.

garante a execução de segundo a segundo a partir de limiares estáticos. Por exemplo, se o carro está dentro da zona do evento climático, a velocidade do carro é reduzida em 30% do máximo da via. Caso contrário, se o carro já estiver abaixo desse limiar, a velocidade não é alterada. O mecanismo de sincronização de tempo garante que mesmo que múltiplos turnos de execução tenham ocorrido, as alterações só ocorrem em um delta mínimo de tempo, por exemplo, de um em um segundo.

Por fim, é importante salientar que a implementação do FASTER aqui utilizada é a versão do código PANDDDORA, escrito em C++, licenciado sob a *GNU Lesser General Public License* (LGPL) [48]. As versões das ferramentas de simulação são as mesmas encontrada na literatura, OMNeT++ 4.3, Veins 4.3 e SUMO 0.25.0 – na Figura 4.4, pode-se ver uma simulação utilizando todas as ferramentas supracitadas. No capítulo a seguir, será apresentado o teste de desempenho das simulações, com os resultados coletados em cenários com e sem a presença dos eventos climáticos.

Capítulo 5

Análise e Resultados

Neste capítulo são detalhados os resultados obtidos para diferentes execuções de simulação do tráfego. Os parâmetros utilizados são registrados na tabela 5.1 abaixo. Note que todas as execuções ocorreram para o mesmo intervalo de tempo, mas sob diferentes densidades de veículos. A fixação do valor de tempo é determinante na coleta dos dados, já que um período de duração maior resultaria numa acentuação do efeito da dispersão causada, possivelmente inviabilizando algumas das viagens. Nota-se ainda que o evento climático escolhido, chuva torrencial, tem igual intensidade em todas as execuções, causando o mesmo retardo precautório na velocidade média dos veículos, aproximadamente $\frac{1}{3}$.

Tabela 5.1: Parâmetros do cenário de rede viária

Parâmetro	Valor
área total	$1km^2$
limite de tempo	$5min$
densidade de veículos	20, 100 e 300 veículos
velocidade máxima	$14m/s$
área atingida	$31.415,93m^2$
queda de velocidade	$\approx 30\%$
índice de precipitação	$\geq 60mm/h$
nível de segurança	<i>muito perigoso</i>

Dentre todas as estatísticas analisadas, destacamos aqui as mais relevantes para o estudo da proposta. Sendo essas apontadas: quantidade acumulada de mensagens duplicadas, tempo total de espera acumulado e total de mensagens recebidas por *broadcast*.

5.1 Acumulado de Mensagens Duplicadas

O acumulado de mensagens duplicadas é uma métrica que avalia o número de mensagens que precisam ser retransmitidas dentro da VANET e está diretamente associado à confiabilidade da comunicação. Uma mensagem deve ser retransmitida quando for corrompida ou perdida e não houver confirmação do recebimento pelo receptor.

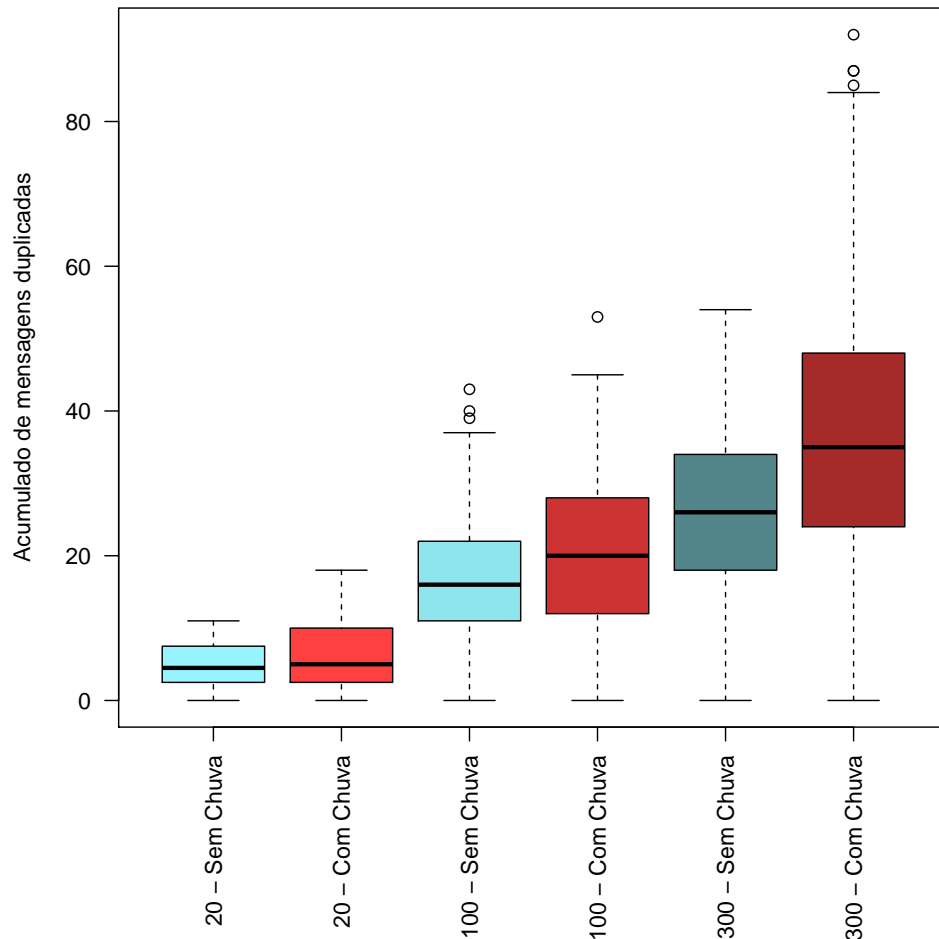


Figura 5.1: Acumulado de mensagens duplicadas por cenário de 20, 100 e 300 carros, com a ausência e a presença do efeito de chuva.

Na figura 5.1, a principal análise está no comportamento crescente das mensagens duplicadas que respondem ao aumento do número de veículos no cenário e à presença do evento de chuva. Para uma densidade menor de veículos há uma maior concentração dos dados. Já para uma densidade maior, o número de retransmissões por veículo aparece mais disperso. O surgimento da chuva acentua ainda mais essa dispersão em consequência do agrupamento de carros em menor velocidade dentro da área de chuva e com o afastamento dos carros mais rápidos fora da área. O crescimento se dá apesar do módulo de supressão de *broadcast* e do mecanismo de agregação implementados no FASTER [43].

5.2 Tempo de Espera Acumulado

O tempo de espera acumulado avalia o tempo gasto por veículos em congestionamentos. No cenário simulado, um veículo contribui para a formação de um congestionamento quando há um acidente no restante do caminho e não é possível tomar rotas alternativas ou quando o fluxo de veículos não pode ser acomodado pela capacidade da via.

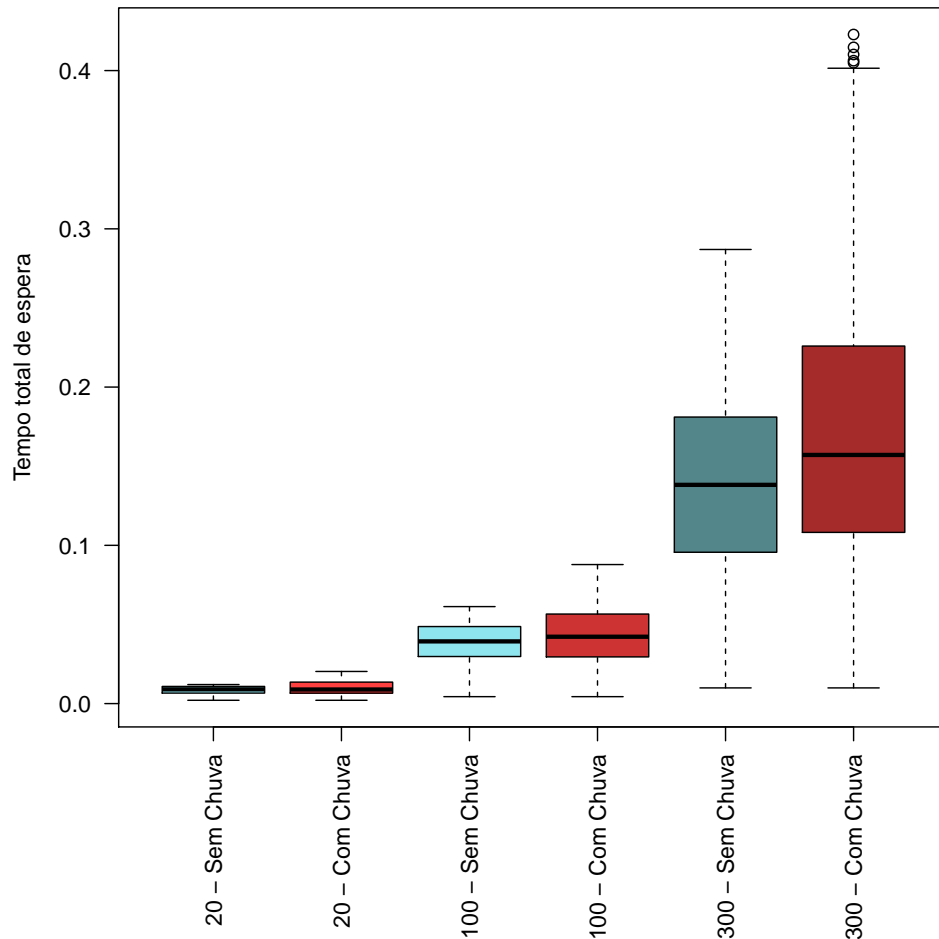


Figura 5.2: Tempo de espera acumulado por cenário de 20, 100 e 300 carros, com a ausência e a presença do efeito de chuva.

Na figura 5.2, a principal análise se dá a partir do aumento dramático no tempo de espera com o aumento da densidade de veículos. Nesse caso, com o evento de chuva, a convergência é comprometida e a dispersão dos dados aumenta bastante (a barra do intervalo de confiança é sempre maior na presença da chuva). O crescimento indica tanto um aumento do número de congestionamentos como um possível aumento da formação do congestionamento. Vale ressaltar que o evento de chuva testado representa apenas 3.14% da área total do cenário, mesmo com uma representação tão limitada o mesmo já altera drasticamente a convergência das amostras.

5.3 Total de Mensagens Recebidas

Na figura 5.3 temos os dados do número total de transmissões recebidas por veículo, para as diferentes densidades, com e sem a ocorrência do evento de chuva.

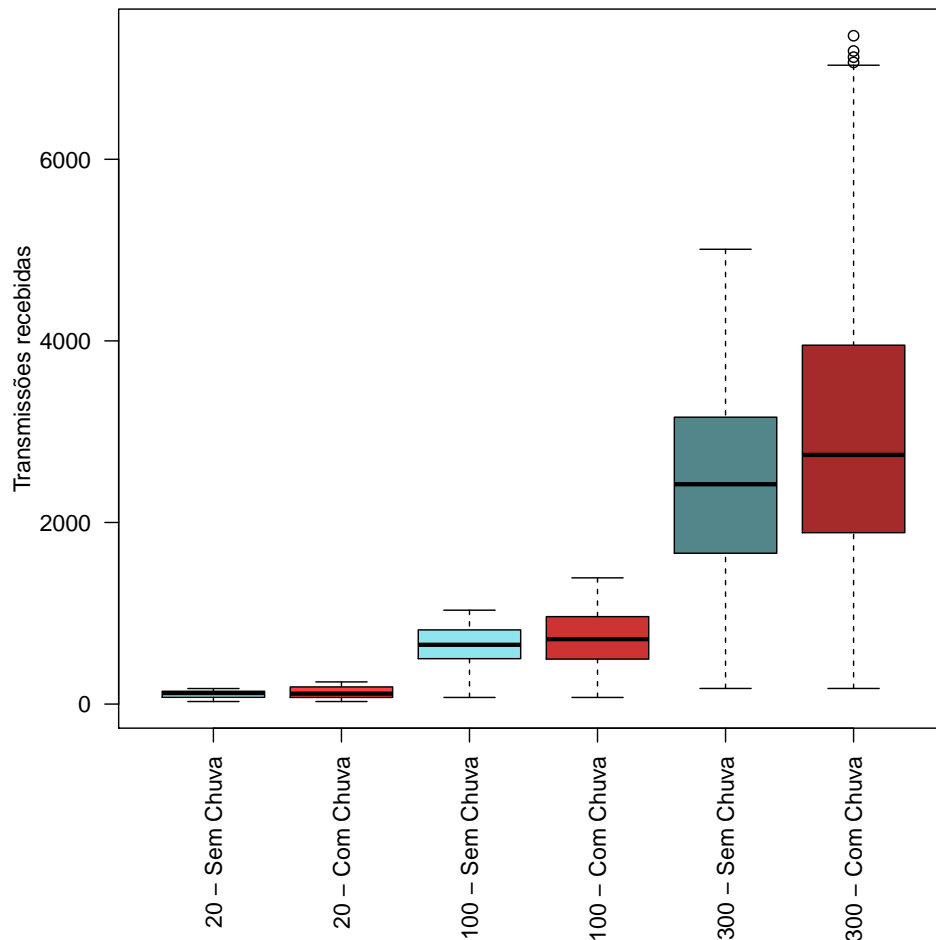


Figura 5.3: Total de mensagens recebidas por *broadcast* por cenário de 20, 100 e 300 carros, com a ausência e a presença do efeito de chuva.

Aqui, a principal análise se dá a partir do volume crescente de mensagens recebidas por *broadcast*, com o aumento da concentração de carros. A convergência dos dados também é comprometida em resposta ao evento de chuva, elevando a dispersão dos resultados. Outro ponto interessante a se ressaltar, é que as mensagens recebidas apresentam um comportamento similar, senão, idêntico, ao do tempo total de espera. Isso pode ser caracterizado como um relacionamento de proporcionalidade direta, claramente causado pelo efeito de aglomeração atribuído à formação dos congestionamentos, diminuindo a distância de transmissão e fazendo com que mais carros recebam mensagens por *broadcast*.

Os resultados indicam que as simulações obtidas por soluções na literatura podem ser gravemente comprometidas na ocasião de eventos climáticos inclementes. Essa resposta é coerente

com o que se espera para sistemas onde a preditividade se aproxima de zero, como com os de dados hidrológicos reais para sistemas atmosféricos induzindo alterações súbitas no clima.

Observa-se que num cenário de catastrofismo climático de longa duração, o algoritmo elevaria os pesos das vias afetadas no episódio por muito tempo. Com isso, os veículos presentes na região abandonariam as vias prejudicadas pelo evento inclemente assim que possível. Enquanto isso, outros veículos fora da região receberiam a atualização por meio das mensagens de conhecimento do cenário e optariam por rotas não prejudicadas. Consequentemente resultaria numa área evitada sob a influência do evento climático, com altos pesos nas vias vizinhas dado o aumento do fluxos de veículos e maiores formações de congestionamento. Veículos de emergência ainda teriam livre acesso à região, tanto para tarefas de reconhecimento como resgate e reparação. Veículos não conectados não estariam cientes das condições e ainda incluiriam suas vias entre as opções de rota.

Um outro comportamento que pode ser observado é que com a redução da velocidade média os veículos levam mais tempo para se distanciarem uns dos outros, perdendo parte do dinamismo do fluxo. Num cenário maior – como num cenário rural – isso acarretaria a formação de grupos separados, com possíveis restrições ao alcance de transmissão do conhecimento de cada grupo. Num cenário de vias arteriais, o planejamento do tempo de intervalos de semáforos ofereceria o suporte às estratégias para melhor acomodar o remanejamento provocado no tráfego.

Capítulo 6

Conclusão e Trabalhos Futuros

A importância dos CVs reside na emergência de algumas necessidades reais verificadas. A competitividade crescente do cenário automotivo tem levado a indústria a se voltar cada vez mais para o desenvolvimento de aplicações que expandam as habilidades humanas de cognição. A demanda crescente por sistemas de alerta que ajudem na redução do número de fatalidades em acidentes de trânsito, os quais, em maioria, se devem à erros cometidos pelo condutor. A tentativa de redução de emissão de poluentes e melhores experiências de viagem que contam com um nível maior de conforto e segurança.

SGTs são compostos por um conjunto de aplicações e ferramentas de gerenciamento, e buscam integrar comunicação, sensoriamento e tecnologias de processamento. Os dados relacionados ao trânsito são coletados a partir de fontes heterogêneas tais como veículos, semáforos, e sensores da via. Ao agregar e explorar esses dados de uma maneira cooperativa (*e.g.*, entre veículos) diversos perigos no trânsito podem ser identificados e conseqüentemente controlados, melhorando a eficiência geral do tráfego e providenciando um fluxo mais suave. Ainda assim, a maioria das soluções de SGT atuais não consideram os efeitos de eventos climáticos sobre o tráfego de veículos nas vias.

Neste trabalho foi proposto um mecanismo de ocorrência de eventos de precipitação para um SGT conceituado na literatura, o FASTER. O modelo de mobilidade utilizado, *Manhattan Grid*, com área total de $1km^2$, permite que os carros se desloquem numa topologia de ruas perpendiculares, formada por 9×9 blocos de edifícios, a velocidades máximas de $14m/s$.

A partir de simulações, o mecanismo de precipitação proposto mostrou que a geração de uma área de chuva torrencial – com índice de precipitação $\geq 60mm/h$ ou $100mm/dia$ – atuando sobre apenas 3, 14% da área total do mapa é suficiente para causar uma dispersão dramática nos valores obtidos para o acumulado de mensagens duplicadas, total de mensagens recebidas e tempo de atraso no percurso por veículo. Dessa forma, conclui-se que ao se utilizar um simulador que consegue lançar os eventos climáticos aleatórios, SGTs tradicionais podem facilmente apresentar um mau comportamento nessas circunstâncias de clima adversos. Esse mau compor-

tamento indica a necessidade de novas pesquisas para a criação de SGTs capazes de lidar com tais situações.

Como trabalho futuro é sugerida realização de simulações para diferentes índices de precipitação, densidades maiores de veículos e que contem com um tráfego mais heterogêneo. É sugerida ainda a experimentação com veículos de emergência, que não obedeçam ao fluxo convencional da rede viária, especialmente nas zonas atingidas pelas condições climáticas severas. Além disso, pode ser interessante analisar o funcionamento de aplicações de disseminação de alertas com previsões climáticas para os próximos instantes, conferindo uma abordagem pró-ativa com relação ao mecanismo, e possivelmente prevenindo um impacto tão grande nos roteiros de viagem.

Referências

- [1] SHARIF, A.; Ping Li, J.; Asim Saleem, M. Internet of Things Enabled Vehicular and Ad Hoc Networks for Smart City Traffic Monitoring and Controlling: A Review. *International Journal of Advanced Networking Applications*, v. 10, n. 3, p. 3833–3842, Nov. 2018. 1
- [2] HASAN, S. F.; SIDDIQUE, N.; CHAKRABORTY, S. *Intelligent transportation systems: 802.11-based vehicular communications*. 2017. 1, 9, 10
- [3] SMITH, R.; SMITH, R. Directive 2010/41/EU of the European Parliament and of the Council of 7 July 2010. *Core EU Legislation*, p. 352–355, 2015. 1, 8
- [4] SUMALEE, A.; HO, H. W. Smarter and more connected: Future intelligent transportation system. *IATSS Research*, v. 42, n. 2, p. 67–71, May 2018. 1, 8
- [5] Federal Highway Administration. Operations story: Congestion, a national issue. Disponível em: <<https://ops.fhwa.dot.gov/aboutus/opstory.htm>> [Acesso em: 08/12/2019]. 2
- [6] DE SOUZA, A. M.; BRENNAND, C. A.; YOKOYAMA, R. S.; DONATO, E. A.; MADEIRA, E. R.; VILLAS, L. A. Traffic management systems: A classification, review, challenges, and future perspectives. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, v. 13, n. 4, 2017. 2, 10, 20
- [7] MEUSER, T.; BISCHOFF, D.; STEINMETZ, R.; RICHERZHAGEN, B. Simulation platform for connected heterogeneous vehicles. *VEHITS 2019 - Proceedings of the 5th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems*, v. 1, p. 412–419, Jan. 2019. 2
- [8] GORA, P. Simulation-Based Traffic Management System for Connected and Autonomous Vehicles. *Road Vehicle Automation 4*, p. 257–266, 2018. 2, 21
- [9] KRAJZEWICZ, D. *Traffic Simulation with SUMO – Simulation of Urban Mobility*. New York, NY: Springer New York, 2010. p. 269–293. 2, 3
- [10] PISANO, P. A.; GOODWIN, L. C. Research Needs for Weather-Responsive Traffic Management. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, National Research Council, Washington, , n. 1867, p. 127–131, 2004. 3
- [11] Michael Mann. Twitter: @MichaelEMann. Disponível em: <<https://twitter.com/MichaelEMann>> [Acesso em: 08/12/2019]. 5

- [12] The Atlantic. Photos: How Do Weather Events Impact Roads? Disponível em: <<https://www.theatlantic.com/photo/2017/08/photos-the-aftermath-of-hurricane-harvey/538143/>> [Acesso em: 08/12/2019]. 5
- [13] ZHANG, W.; VILLARINI, G.; VECCHI, G. A.; SMITH, J. A. Urbanization exacerbated the rainfall and flooding caused by hurricane Harvey in Houston. *Nature*, London, v. 563, n. 7731, p. 384–388, Nov. 2018. 5
- [14] Alerta Rio. Sistema alerta rio da prefeitura do rio de janeiro: Maiores chuvas. Disponível em: <<http://www.sistema-alerta-rio.com.br/dados-meteorologicos/maiores-chuvas/>> [Acesso em: 07/12/2019]. 6
- [15] G1 Rio, TV Globo e GloboNews. Rio de Janeiro: Maior chuva em 22 anos no Rio. Disponível em: <<https://g1.globo.com/rj/rio-de-janeiro/noticia/2019/04/09/bombeiros-registram-deslizamento-no-morro-da-babilonia-rio.ghtml>> [Acesso em: 07/12/2019]. 6
- [16] DE METEOROLOGIA (INMET), I. N. Destaques do período de 06 a 12/04/2019. v. 04, n. 61, p. 33–34, Apr. 2019. 6
- [17] Ministério da Agricultura. Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/>> [Acesso em: 08/12/2019]. 6
- [18] PENDERGRASS, A. G. What precipitation is extreme? *Science*, Washington, v. 360, n. 6393, p. 1072–1073, 2018. 6
- [19] Alert-AS. Centro Virtual para Avisos de Eventos Severos para o Sul da América do Sul. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/alert-as/>> [Acesso em: 08/12/2019]. 6
- [20] GOODWIN, L. C. Weather Impacts on Arterial Traffic Flow. *Simulation*, p. 749–759, Dec. 2002. 7
- [21] Federal Highway Administration. Road Weather Management: How Do Weather Events Impact Roads? Disponível em: <https://ops.fhwa.dot.gov/weather/q1_roadimpact.htm> [Acesso em: 07/12/2019]. 7
- [22] TOOR, Y.; MÜHLETHALER, P.; LAOUITI, A.; De La Fortelle, A. Vehicle ad hoc networks: Applications and related technical issues. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, v. 10, n. 3, p. 74–88, Sept. 2008. 8
- [23] WILLKE, T.; TIENTRAKOOL, P.; MAXEMCHUK, N. A survey of inter-vehicle communication protocols and their applications. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, v. 11, n. 2, p. 3–20, June 2009. 8
- [24] PEARRE, N. S.; RIBBERINK, H. Review of research on V2X technologies, strategies, and operations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 105, n. April 2018, p. 61–70, May 2019. 9

- [25] MACHARDY, Z.; KHAN, A.; OBANA, K.; IWASHINA, S. V2X access technologies: Regulation, research, and remaining challenges. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, v. 20, n. 3, p. 1858–1877, Feb. 2018. 9
- [26] SINGH, G. D.; TOMAR, R.; SASTRY, H. G.; PRATEEK, M. A Review on VANET Routing Protocols and Wireless Standards. *Smart Computing and Informatics*. 9
- [27] CAMACHO, F.; CÁRDENAS, C.; MUÑOZ, D. Emerging technologies and research challenges for intelligent transportation systems: 5G, HetNets, and SDN. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, v. 12, n. 1, p. 327–335, Mar. 2018. 10
- [28] REHENA, Z.; JANSSEN, M. Towards a Framework for Context-Aware Intelligent Traffic Management System in Smart Cities. Republic and Canton of Geneva, Switzerland, v. 76, n. 1, p. 893–898, Apr. 2018. 10
- [29] UHLEMANN, E. Time for Autonomous Vehicles to Connect. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, v. 13, n. 3, p. 10–13, Aug. 2018. 10
- [30] KAMRANI, M.; ARVIN, R.; KHATTAK, A. J. Extracting Useful Information from Basic Safety Message Data: An Empirical Study of Driving Volatility Measures and Crash Frequency at Intersections. *Transportation Research Record*, v. 2672, n. 38, p. 290–301, May 2018. 10
- [31] CHEN, S.; HU, J.; SHI, Y.; PENG, Y.; FANG, J.; ZHAO, R.; ZHAO, L. Vehicle-to-Everything (v2x) Services Supported by LTE-Based Systems and 5G. *IEEE Communications Standards Magazine*, v. 1, n. 2, p. 70–76, May 2017. 10
- [32] SHANKLAND, S. CNET: FCC endorses C-V2X mobile network that lets cars talk to each other. Disponível em: <<https://www.cnet.com/news/fcc-endorses-c-v2x-mobile-network-that-lets-cars-talk-to-each-other/>> [Acesso em: 14 de dezembro de 2019]. 10
- [33] GOPALAKRISHNA, D.; KITCHENER, F.; SERULLE, N. U.; NEUNER, M.; SCHMIDT, J.; DONALDSON, G.; DUVALL, J. *Connected Vehicle-Enabled Weather Responsive Traffic Management – Final Report*. Number April. U.S. Department of Transportation, 2018. 10
- [34] MEYER, M. *How to Use and Derive Stylized Facts for Validating Simulation Models*. 2019. 11
- [35] OpenSim. OMNeT++: OMNeT++ Discrete Event Simulator. Disponível em: <<https://omnetpp.org/>> [Acesso em: 08/12/2019]. 12
- [36] OpenSim. INET: INET Framework. Disponível em: <<https://inet.omnetpp.org/>> [Acesso em: 08/12/2019]. 13
- [37] SOMMER, C. Veins: Vehicles in Network Simulation. Disponível em: <<http://veins.car2x.org/>> [Acesso em: 08/12/2019]. 13
- [38] Institute of Transportations Systems. Sumo: Simulation of urban mobility. Disponível em: <<https://sumo.dlr.de/docs/>> [Acesso em: 08/12/2019]. 14

- [39] OpenStreetMap. Openstreetmap. Disponível em: <<https://www.openstreetmap.org/>> [Acesso em: 05/12/2019]. 15
- [40] NIRMALATHAS, T. A. How Is the Networked Society Impacting Us? *Proceedings of the IEEE*, v. 106, n. 3, p. 335–338, Mar. 2018. 16
- [41] ANTONOPOULOS, N.; GILLAM, L. *Cloud Computing: Principles, Systems and Applications*. Number 2. 2017. 16
- [42] Hu, S.; Lin, H.; Xie, K.; Dai, J.; Qui, J. Impacts of rain and waterlogging on traffic speed and volume on urban roads. p. 2943–2948, Nov. 2018. 17
- [43] DE SOUZA, A. M.; VILLAS, L. A. A fully-distributed traffic management system to improve the overall traffic efficiency. New York, NY, USA, p. 19–26, 2016. 25, 29, 35
- [44] VIRDIS, A.; KIRSCH, M. *Recent advances in network simulation: The omnet++ environment and its ecosystem*. EAI/Springer Innovations in Communication and Computing. Springer, Cham, 2019. 29
- [45] Institute of Transportations Systems. Sumo Documentation: Tutorials/Manhattan. Disponível em: <<https://sumo.dlr.de/docs/Tutorials/Manhattan.html>> [Acesso em: 07/12/2019]. 30
- [46] BAUZA, R.; GOZALVEZ, J.; SANCHEZ-SORIANO, J. Road traffic congestion detection through cooperative Vehicle-to-Vehicle communications. *Proceedings – Conference on Local Computer Networks, LCN*, v. 76, n. 1, p. 606–612, May 2010. 30
- [47] KUNZ, G.; UNIVERSITY, R. A. *Modeling and tools for network simulation*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010. 32
- [48] Free Software Foundation. GNU: GNU Lesser General Public License. Disponível em: <<http://www.gnu.org/licenses/lgpl-3.0.en.html>> [Acesso em: 07/12/2019]. 33