



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

# **Uma Arquitetura para Planejamento de Rotas Veiculares em Cidades Inteligentes**

Itauan Silva Eduão Ferreira



São Cristóvão – Sergipe

2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

Itauan Silva Eduão Ferreira

## **Uma Arquitetura para Planejamento de Rotas Veiculares em Cidades Inteligentes**

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

Orientador: Eduardo Oliveira Freire

Coorientador: Ricardo José Paiva de Britto Salgueiro

São Cristóvão – Sergipe

2019

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE**

F383a Ferreira, Itauan Silva Eduão  
Uma arquitetura para planejamento de rotas veiculares em  
cidades inteligentes / Itauan Silva Eduão Ferreira ; orientador  
Eduardo Oliveira Freire . - São Cristóvão, 2019.  
69 f. : il.

Dissertação (mestrado em Ciência da Computação) –  
Universidade Federal de Sergipe, 2019.

1. Computação. 2. Algoritmos. 3. Cidades inteligentes. 4.  
Inteligência artificial. 5. Sistemas inteligentes de veículos  
rodoviários. I. Freire, Eduardo Oliveira orient. II. Título.

CDU 004



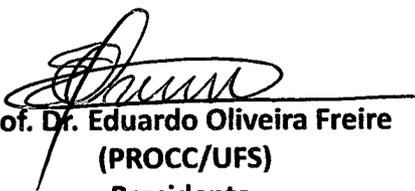
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE  
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA  
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

---

**Ata da Sessão Solene de Defesa da Dissertação do  
Curso de Mestrado em Ciência da Computação-UFS.  
Candidato: Itauan Silva Eduão Ferreira**

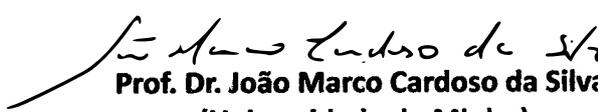
Em 28 dias do mês de Agosto do ano de dois mil e dezenove, com início às 09h00min, realizou-se na Sala de Seminário do DCOMP da Universidade Federal de Sergipe, na Cidade Universitária Prof. José Aloísio de Campos, a Sessão Pública de Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato **Itauan Silva Eduão Ferreira**, que desenvolveu o trabalho intitulado: "*Uma Arquitetura para Planejamento de Rotas Veiculares em Cidades Inteligentes*", sob a orientação do Prof. Dr. **Eduardo Oliveira Freire**. A Sessão foi presidida pelo Prof. Dr. **Eduardo Oliveira Freire** (PROCC/UFS), que após a apresentação da dissertação passou a palavra aos outros membros da Banca Examinadora, Prof. Dr. **Kalil Araujo Bispo** (PROCC/UFS) e, em seguida, ao Prof. **Edilayne Meneses Salgueiro** (Externo ao Programa/UFS) e Prof. **João Marco Cardoso da Silva** (Externo à Instituição/Universidade do Minho). Após as discussões, a Banca Examinadora reuniu-se e considerou o mestrando (a) APROVADO "(aprovado/reprovado)". Atendidas as exigências da Instrução Normativa 01/2017/PROCC, do Regimento Interno do PROCC (Resolução 67/2014/CONEPE), e da Resolução nº 25/2014/CONEPE que regulamentam a Apresentação e Defesa de Dissertação, e nada mais havendo a tratar, a Banca Examinadora elaborou esta Ata que será assinada pelos seus membros e pelo mestrando.

Cidade Universitária "Prof. José Aloísio de Campos", 28 de Agosto de 2019.

  
Prof. Dr. **Eduardo Oliveira Freire**  
(PROCC/UFS)  
Presidente

  
Prof. Dr. **Kalil Araujo Bispo**  
(PROCC/UFS)  
Examinador Interno

  
Prof. Dr. **Edilayne Meneses Salgueiro**  
(Dcomp/UFS)  
Examinador Externo ao Programa

  
Prof. Dr. **João Marco Cardoso da Silva**  
(Universidade do Minho)  
Examinador Externo à Instituição

  
**Itauan Silva Eduão Ferreira**  
Candidato

*À minha família, amigos e professores.*

# Agradecimentos

Agradeço à minha família pelo incentivo, especialmente ao meu pai Cleilton Eduão, à minha mãe Elka, aos meus irmãos Jonata, Gibran e João Gabriel, que são grande parte do combustível que me move. Agraço à minha companheira e melhor amiga Daiane pela paciência, amor e tempo dedicados a mim há muitos anos.

Agradeço a todos os amigos que me acompanharam nesse processo, contribuindo direta e indiretamente com esse trabalho, pelos momentos de descontração e desabafo. Agradeço à Fillipe Paz, Jackson Tavares e Thiago Xavier pelo apoio imensurável. Agradeço aos amigos de laboratório Wesley Oliveira, Jonatha Cunha e Lucas Aquino. Aos amigos colegas de trabalho Demair e Eduardo pela compreensão e paciência. Agradeço aos amigos de longa data.

Preciso agradecer enormemente ao meu orientador, Eduardo Freire, pela confiança depositada. Aos meus professores Ricardo e Edilayne Salgueiro, que durante a minha vida acadêmica ultrapassaram os limites de orientadores e se tornaram bons amigos. Agradeço a todos os outros professores do DCOMP/UFS e PROCC que contribuíram com a minha formação.

*O óbvio é aquilo que nunca é visto até que alguém o manifeste com simplicidade.*  
(Kahlil Gibran)

# Resumo

A grande quantidade de veículos e o crescimento desordenado das cidades contribuíram para o agravamento do problema dos congestionamentos de trânsito. Grandes cidades já apresentam vários problemas decorrentes da grande quantidade de veículos, desde a poluição até a ineficiência em atendimentos de emergência. Esses problemas causam grandes prejuízos à qualidade de vida das pessoas que perdem bastante tempo no trânsito, ao sistema de saúde que não consegue atender demandas emergenciais com a rapidez necessária, aos cofres públicos que precisam destinar grandes quantidades de recursos para mitigar as consequências de acidentes. Para resolver problemas relacionados ao tráfego, uma das soluções promissoras é a implementação de um Sistema Inteligente de Transporte - SIT. Os SITs objetivam prover serviços inovadores para estabelecer sistemas de transportes mais inteligentes e harmoniosos, onde os vários usuários podem viajar de forma mais segura e mais rápida. Nesse trabalho foi desenvolvido uma arquitetura para avaliação de métodos de planejamento dinâmico de rotas entre veículos que permita a obtenção de rotas ótimas e sub-ótimas, computacionalmente viáveis em termos de tempo de processamento e com qualidade, considerando medidas de qualidade como níveis de congestionamento, comprimento de rotas e tempo de viagem. O sistema proposto também objetivou permitir que as rotas planejadas pelos veículos, entre um ponto de origem e um ponto de destino, sejam construídas levando em consideração o planejamento dos demais veículos do domínio de atuação, permitindo o compartilhamento de informações entre os veículos e infraestruturas computacionais através de redes veiculares (VANETs). Os resultados obtidos mostraram que a existência de um sistema de planejamento dinâmico de rotas melhora as condições do trânsito, assim como, o uso de algoritmos desenvolvidos utilizando paralelismo através de *Graphics Processors Units* - GPU, reduz o tempo de processamento necessário para cálculos de rotas.

**Palavras-chave:** Algoritmos, Cidades Inteligentes, Planejamento de Rotas, Sistemas Inteligentes de Transporte, VANET.

# Abstract

The large number of vehicles and the disorderly growth of cities have contributed to the problem of traffic congestion. Large cities already have several problems arising from the large number of vehicles, from pollution to inefficiency in emergency care. These problems cause major damage to the quality of life of people who spend a lot of time in traffic, the health system that cannot meet emergency demands quickly enough, the public coffers that need to allocate large amounts of resources to mitigate the accidents consequences. To solve traffic related problems, one of the promising solutions is the implementation of an Intelligent Transport System - SIT. SITs aim to provide innovative services to establish smarter and more harmonious transportation systems where multiple users can travel safer and faster. In this work, an architecture was developed to evaluate methods of dynamic route planning between vehicles that allows obtaining optimal and suboptimal routes, computationally viable in terms of processing time and quality, considering quality measures as congestion levels, route length and travel time. The evaluated system also aimed to allow the routes planned by the vehicles between origin and destination points to be constructed taking into consideration the planning of other vehicles in the domain, allowing the sharing of information between vehicles and computational infrastructures. through vehicular networks (VANETs). The results showed that the existence of a dynamic route planning system improves traffic conditions, as well as the fact that the algorithm is developed with a parallel approach using GPU, which reduces the time required for route calculation.

**Keywords:** Algorithms, Smart Cities, Route Planning, Intelligent Transportation System, VANET.

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Arquitetura VANET. Fonte: Adaptado de (PAPADIMITRATOS et al., 2009)	19
Figura 2 – Etapas da pesquisa . . . . .	22
Figura 3 – Fases de um mapeamento sistemático . . . . .	26
Figura 4 – Passos executados na revisão sistemática . . . . .	27
Figura 5 – Trabalhos encontrados por base de busca . . . . .	29
Figura 6 – Filtros de Trabalhos . . . . .	30
Figura 7 – Quantidade de trabalhos selecionados por base de busca . . . . .	33
Figura 8 – Quantidade de trabalhos selecionados por ano de publicação . . . . .	33
Figura 9 – Quantidade de trabalhos por tipo de validação experimental . . . . .	34
Figura 10 – Ferramentas de simulação utilizadas . . . . .	35
Figura 11 – Métricas avaliadas nos trabalhos . . . . .	36
Figura 12 – Tipos de soluções apresentadas . . . . .	37
Figura 13 – Arquitetura do Sistema . . . . .	45
Figura 14 – Arquitetura Implementada do Sistema . . . . .	45
Figura 15 – (a) Quad core Intel CPU e (b) NVIDIA Kepler GPU. . . . .	47
Figura 16 – Modelo Cliente/Servidor do TraCI . . . . .	51
Figura 17 – Arquitetura do VEINS . . . . .	52
Figura 18 – Diagrama lógico da rede/cloud experimental do ELAN . . . . .	53
Figura 19 – Área Simulada vista no OpenStreet Map . . . . .	55
Figura 20 – Área Simulada vista no SUMO . . . . .	55
Figura 21 – Número de veículos . . . . .	56
Figura 22 – Tempo de Processamento de Rotas . . . . .	57
Figura 23 – Tempo Médio de Processamento de Rotas . . . . .	58
Figura 24 – Atualizações por segundo . . . . .	58
Figura 25 – Número de passos de simulação . . . . .	59
Figura 26 – Duração total da simulação . . . . .	60
Figura 27 – Atraso médio de partida . . . . .	61
Figura 28 – Tempo médio de espera . . . . .	62
Figura 29 – Atraso total médio . . . . .	62
Figura 30 – Comprimento médio das rotas . . . . .	63
Figura 31 – Tempo médio das viagens . . . . .	64
Figura 32 – Mensagens Recebidas . . . . .	64
Figura 33 – Pacotes Perdidos . . . . .	65

Figura 34 – Tempo Backoff . . . . . 66

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Resumo das escolhas metodológicas . . . . .	21
Tabela 2 – Questões de pesquisa . . . . .	27
Tabela 3 – String de busca . . . . .	28
Tabela 4 – Bases de busca . . . . .	28
Tabela 5 – Critérios de inclusão . . . . .	29
Tabela 6 – Critérios de exclusão . . . . .	29
Tabela 7 – Estudos primários selecionados . . . . .	30
Tabela 8 – Pseudocódigo do algoritmo A* . . . . .	48
Tabela 9 – Pseudocódigo do algoritmo Parallel A* . . . . .	50
Tabela 10 – Parâmetros de simulação das VANETs . . . . .	56

# Lista de abreviaturas e siglas

ACO	Ant Colony Optimization
AODV	Ad Hoc On Demand Distance Vector
API	Application Programming Interfaces
ARA*	Anytime Repairing A*
CPU	Central Process Unit
CTT	Current Travel Time
DSP	Delay-constrained Shortest Path Algorithm
EKF	Extended Kalman Filter
ELAN	Experimental Laboratory in computers Networks
FGWSO	Fractional Glowworm Swarm Optimization
FHWA	Federal Highway Administration
FPGA	Field-Programmable Gate Array
GPGPU	General Purpose Graphical Processing Unit
GPU	Graphical Process Unit
HPC	High Performance Computing
HVG	Hierarchical Voronoi Graph
IDE	Integrated Development Environment
LCAD	Laboratório de Computação de Alto Desempenho
MANET	Mobile Ad-hoc Network
MSL	Mapeamento Sistemático da Literatura
NED	Network Description
NS3	Network Simulator 3
RAM	Random Access Memory
RSU	Road Side Unit

SIT	Sistema Inteligente de Transporte
SSD	Solid-State Drive
SUMO	Simulation of Urban MObility
TIC	Tecnologias da Informação e Comunicação
TMS	Traffic Management System
TraCI	Traffic Control Interface
TTE	Travel Time Estimation
VANET	Vehicular Ad-hoc Network
VBA*	VANET-Based A*
VEINS	Vehicles in Network Simulation
V2I	Vehicle to Infrastructure
V2V	Vehicle to Vehicle

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>16</b>
1.1	Sistemas Inteligentes de Transporte	17
1.1.1	Planejamento Dinâmico de Rotas	18
1.1.2	VANETs	19
1.2	Problemática	20
1.3	Hipótese	20
1.4	Objetivos	20
1.4.1	Objetivos Específicos	21
1.5	Escopo Negativo	21
1.6	Método	21
1.7	Organização do Trabalho	24
<b>2</b>	<b>Mapeamento Sistemático</b>	<b>25</b>
2.1	Planejamento	26
2.1.1	Questões de Pesquisa	27
2.1.2	Estratégias de Buscas	28
2.1.3	Bases de Busca	28
2.1.4	Critérios de Inclusão e Exclusão	28
2.2	Execução	29
2.3	Análise	30
2.4	Resultados da Análise	32
2.4.1	Base dos Trabalhos	32
2.4.2	Ano das Publicações	32
2.5	Respostas às Questões de Pesquisa	34
2.5.1	Foram utilizadas ferramentas na validação da solução avaliada? Quais?	34
2.5.2	Quais métricas foram utilizadas para medir a qualidade da solução avaliada?	35
2.5.3	Algum método ou etapa de planejamento de rotas é proposto? Qual? Qual algoritmo é utilizado?	36
<b>3</b>	<b>Trabalhos Relacionados</b>	<b>38</b>
3.1	Modelos de Predição	39
3.2	Estratégias de Roteamento	40
3.2.1	Algoritmos Bioinspirados	40
3.2.2	Algoritmos de Busca	40
3.3	Métodos de Disseminação	41
3.4	Arquitetura	42

3.4.1	Centralizada . . . . .	42
3.4.2	Descentralizada . . . . .	42
<b>4</b>	<b>Planejamento de Rotas . . . . .</b>	<b>44</b>
4.1	Arquitetura Desenvolvida . . . . .	44
4.2	Paralelismo usando GPU . . . . .	46
4.3	Algoritmo <i>parallel A*</i> . . . . .	47
4.3.1	Algoritmo Paralelizado . . . . .	49
4.4	Ferramentas de Simulação . . . . .	50
4.4.1	SUMO - <i>Simulation of Urban MObility</i> . . . . .	50
4.4.1.1	TraCI - <i>Traffic Control Interface</i> . . . . .	51
4.4.2	OMNET++ . . . . .	51
4.4.3	VEINS - <i>Vehicles in Network Simulation</i> . . . . .	52
4.5	Recursos . . . . .	52
<b>5</b>	<b>Resultados e Discussão . . . . .</b>	<b>54</b>
5.1	Estudo de Caso . . . . .	54
5.2	Análise Quantitativa dos Resultados . . . . .	56
5.2.1	Tempo de Processamento de Rotas . . . . .	56
5.2.2	Taxa de Atualização da Simulação . . . . .	57
5.2.3	Numero de eventos de Simulação . . . . .	58
5.2.4	Tempo de Simulação . . . . .	59
5.2.5	Análise dos Resultados de Qualidade do Serviço . . . . .	60
5.2.5.1	Atraso Médio de Entrada . . . . .	60
5.2.5.2	Atraso Médio de Espera . . . . .	60
5.2.5.3	Atraso Total Médio . . . . .	61
5.2.5.4	Comprimento Médio das Rotas . . . . .	61
5.2.5.5	Tempo Médio de Viagem . . . . .	63
5.3	Resultados VANETs . . . . .	63
<b>6</b>	<b>Considerações Finais . . . . .</b>	<b>67</b>
6.1	Contribuições . . . . .	67
6.2	Conclusões . . . . .	68
6.3	Sugestões de Trabalhos Futuros . . . . .	69
	<b>Referências . . . . .</b>	<b>70</b>

# 1

## Introdução

Um dos grandes problemas que afetam as cidades do mundo, e conseqüentemente a vida de seus moradores, são os congestionamentos de trânsito. A quantidade de veículos e o crescimento desordenado das cidades contribuíram para o agravamento desse problema. Em grandes centros urbanos ocorrem vários problemas decorrentes da grande quantidade e concentração de veículos, esses problemas vão desde a poluição até a ineficiência dos veículos de emergência e causam grandes prejuízos. Há prejuízos à qualidade de vida dos habitantes que perdem bastante tempo presos no trânsito, há prejuízos ao sistema de saúde que não consegue atender demandas emergenciais com a rapidez necessária, aos cofres públicos que precisam destinar grandes quantidades de recursos para mitigar as conseqüências de acidentes.

Nos últimos anos, houve um crescimento de interesse no estudo do planejamento de rotas de veículos para construção de Sistemas Inteligentes de Transporte (SIT). Com as crescentes pesquisas em veículos autônomos, esse tema ficou em maior evidência (KACHROO; SASTRY, 2016). Um SIT é uma das dimensões de aplicações que constituem o conceito de cidades inteligentes, suas vantagens podem ser a redução de congestionamentos, a diminuição no consumo de combustível e conseqüente redução de emissão de gases poluentes, a minimização dos tempos de viagens, e a redução de acidentes (SHIMOURA; TENMOKU, 1994).

O conceito de cidades inteligentes possui muitas definições, mas essencialmente, cidades inteligentes é um conceito motivado pela aplicação de Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC) nas cidades para fazer face aos desafios urbanos (HABITAT, 2016). Um dos pontos-chaves ao tornar uma cidade inteligente é prover informações em tempo real para possibilitar a gerência dos recursos, resposta a novos desafios o mais rapidamente possível, além de fornecer informações de apoio aos processos de tomada de decisão dos gestores. Dessa forma, problemas decorrentes do trânsito podem ser reduzidos ao aplicar o conceito de Cidade Inteligente. Entre os avanços tecnológicos necessários para tornar essas soluções aplicáveis nas cidades estão os métodos de planejamento de rotas.

Existem soluções tradicionais para o planejamento de rota de um veículo que favorecem o caminho mais curto entre os pontos de partida e destino. Quando o problema é representado por um grafo, cada via pode ser considerada como uma aresta e cada interseção de vias, cruzamentos, podem ser considerados como vértices. Se o contexto for estático, o algoritmo de Dijkstra (DIJKSTRA, 1959) apresenta uma solução ótima, contudo, se o contexto nas vias for considerado dinâmico, o algoritmo A\* é considerado uma melhor escolha (HART; NILSSON; RAPHAEL, 1968). No entanto, a rota mais curta nem sempre está previamente disponível, podem ocorrer acidentes, eventos aleatórios que fechem as vias, portanto, nesse cenário, é melhor aplicar uma solução que planeje rotas alternativas, isso poderia ser feito com o algoritmo *K-shortest* (EPPSTEIN, 1998).

Essas soluções mencionadas foram desenvolvidas para planejar rotas para um único veículo, no entanto, em cidades do futuro, com vários veículos autônomos calculando suas próprias rotas ótimas individualmente, ou com motoristas atuando com suporte de aplicativos de planejamento de rotas, muitos deles tomariam a mesma decisão, reincidindo no problema dos congestionamentos. Esse problema pode ser evitado, ou reduzido, se for provida comunicação entre os veículos para que eles compartilhem suas decisões entre si. Isso é possível fazendo uso de VANETs - *Vehicular Ad hoc Networks* (YOUSEFI; MOUSAVI; FATHY, 2006).

Segundo Yousefi, Mousavi e Fathy (2006), VANETs são redes móveis adaptadas para veículos. É possível dizer que são um caso especial de *Mobile Ad hoc Network* (MANET), dadas as características especiais, como: mudança rápida da topologia e da velocidade dos nós da rede. Os autores Sumra et al. (2011) afirmam que um dos principais objetivos de uma VANET é prover segurança aos passageiros nas estradas, especificamente para evitar acidentes e congestionamentos. Dessa forma, através das redes veiculares, informações sobre o estado do trânsito, intenções de rotas e estado das vias poderiam ser compartilhadas e utilizadas em um planejamento de rotas colaborativo, utilizando algoritmos de planejamento de rota que possibilitassem minimizar o tempo de viagem dos veículos.

## 1.1 Sistemas Inteligentes de Transporte

Sistemas de transporte são sistemas dinâmicos e complexos, devem considerar aspectos como tipos de veículos, horários de pico, passageiros, pedestres, estado das vias, eventos com grande concentração de pessoas, acidentes, entre outros. O rápido crescimento da quantidade de veículos aliado ao crescimento desestruturado das cidades trouxeram grandes problemas aos sistemas de transporte, como: grandes congestionamentos, risco de acidentes, dificuldades em atender emergências por vias terrestres e maiores índices de emissão de gases poluentes.

Segundo Schrank, Eisele e Lomax (2019), no ano de 2017 nos Estados Unidos, cada motorista gastou cerca de 54 horas a mais em seus veículos e 21 galões de combustível devido aos congestionamentos. Esses números representaram U\$ 1010,00 por veículo, ou seja, houve

um consumo de 3.3 bilhões de galões de combustível e um custo de 166 bilhões de dólares decorrentes de congestionamentos somente nos Estados Unidos em um intervalo de um ano. A comparação com o ano de 1982, quando em média eram gastas 20 horas e 5 galões de combustível, demonstra como o volume de tráfego e congestionamentos aumentou nas cidades americanas, fazendo surgir problemas na vida urbana e nos sistemas de transporte. Para minimizar o impacto desses problemas nos sistemas de transporte, várias abordagens vêm sendo propostas e analisadas, já que expandir a malha rodoviária nem sempre é uma opção em cidades com alta densidade de ocupação. A FHWA - *Federal Highway Administration*, nos EUA, definiu três estratégias gerais para diminuir os problemas decorrentes do tráfego ([SYSTEMATICS et al., 2005](#)):

1. Trabalhar na capacidade atual das estradas e vias, expandi-las quando possível.
2. Estender e incentivar o aumento do uso de transportes alternativos que requeiram menos recursos.
3. Fazer um uso mais eficiente das atuais capacidades das cidades e estradas.

Para reduzir problemas relacionados ao tráfego, uma das soluções mais promissoras é implementar um Sistema Inteligente de Transporte. Segundo ([WANG et al., 2014](#)), o termo SIT é utilizado para descrever um conjunto de conceitos e tecnologias para um tipo de sistema de transporte com o foco principal na integração de Tecnologias de Informação e Comunicação (TICs) com infraestrutura, veículos e usuários do sistema. Os SITs objetivam prover serviços inovadores para estabelecer sistemas de transportes mais inteligentes e harmoniosos, onde os vários usuários poderão viajar de forma mais segura e mais rápida.

Atualmente, comunicações sem fio e tecnologias computacionais têm tido papel crucial no desenvolvimento de um SIT. A arquitetura proposta nesse trabalho tem por objetivo definir as melhores rotas para veículos, podendo ser aplicada como um sistema avançado de assistência ao motorista.

### 1.1.1 Planejamento Dinâmico de Rotas

Um dos subsistemas dos SITs é o assistente de seleção de rotas, que tem como uma das aplicações o planejamento de rotas. O planejamento de rotas inteligente é um serviço essencial no desenvolvimento de uma cidade inteligente. Os sistemas e aplicativos de planejamento de rotas atuais consideram o estado do tráfego no momento do processamento da rota, mas a dinamicidade do tráfego nas grandes cidades demandam que os sistemas de planejamento incorporem novas informações o tempo inteiro.

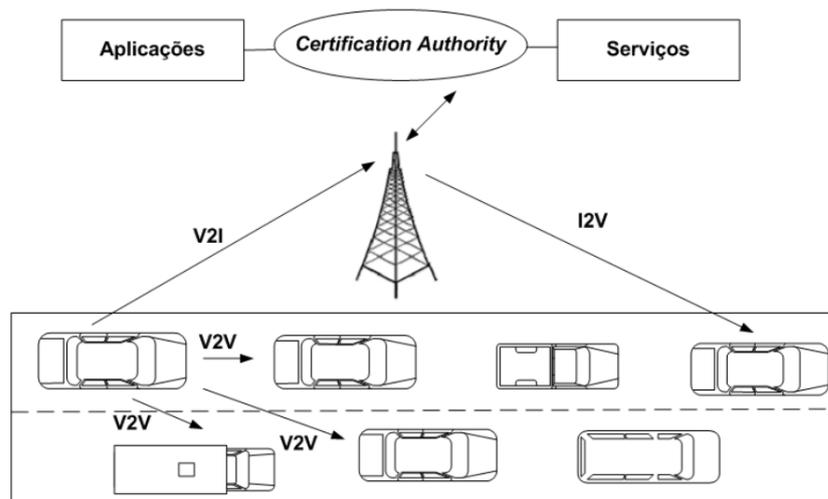
O tempo de viagem de um veículo em áreas urbanas é flutuante devido a vários fatores. Acidentes, grandes eventos esportivos, manutenção de vias ou até condições climáticas

interferem na dinâmica do tráfego. Quando um veículo ou motorista planeja a sua melhor rota para um destino, ele está considerando o estado do trânsito naquele instante. No caso de muitos veículos decidirem pela mesma rota ao mesmo tempo, como por exemplo em caso de necessidade de evacuação, essa rota provavelmente deixará de ser a melhor devido a incidência de congestionamentos.

Uma abordagem interessante para solucionar o problema do planejamento de rotas é fazer com que os veículos processem o planejamento de suas rotas novamente de tempos em tempos, ou a partir da notificação de algum evento. O planejamento de rota poderia ser executado em um *Datacenter* da cidade, e a comunicação entre a infraestrutura computacional da cidade e os veículos pode ser feita através de redes veiculares VANETs.

### 1.1.2 VANETs

Figura 1 – Arquitetura VANET. Fonte: Adaptado de (PAPADIMITRATOS et al., 2009)



Fonte: Adaptado de (PAPADIMITRATOS et al., 2009)

As VANETs são redes móveis veiculares que estabelecem comunicação entre veículos e entre veículos e infraestruturas nas vias. As VANETs são um subgrupo das redes MANETs, por isso elas apresentam topologia dinâmica, são formadas por nós móveis que podem ser clientes, servidores ou roteadores de dados. No entanto, as VANETs possuem algumas características que são próprias de sua natureza e que as diferenciam das outras redes MANETS (YOUSEFI; MOUSAVI; FATHY, 2006). São elas:

- Topologia altamente dinâmica com conexões intermitentes.
- Movimentação dos nós delimitada pelas vias.
- Densidade variável de nós.

- Alta disponibilidade de recursos de energia e armazenamento.

As redes VANETs podem estabelecer dois tipos de comunicação, conexão entre dois veículos (*Vehicle to Vehicle* – V2V), ou comunicação entre veículos e infraestrutura nas vias (*Vehicle to Infrastructure* – V2I), como visto na Figura 1. Esse modelo de comunicação permite que os veículos troquem mensagens diretamente entre si, ou através da infraestrutura de rede existente na via.

## 1.2 Problemática

Considerando as dificuldades de expansão das redes viárias e o problema dos congestionamentos em grandes cidades e suas consequências, tais como: aumento do tempo gasto no trânsito, aumento da quantidade de combustível consumida e prejuízos financeiros decorrentes disso, mencionados anteriormente, é possível inferir que é necessário fazer um uso mais eficiente das atuais capacidades das cidades e estradas.

Para tanto, é necessário o desenvolvimento de sistemas de transporte mais inteligentes, provendo serviços inovadores de gestão de trânsito. Isso pode ser feito aplicando um planejamento adequado de rotas como serviço de uma cidade inteligente. Um sistema de planejamento dinâmico de rotas poderia ser executado em um *Datacenter* da cidade, e a comunicação entre a infraestrutura computacional da cidade e os veículos poderia ser feita através de redes VANETs.

No entanto, os algoritmos para calcular milhares de rotas diversas vezes podem demandar longos tempos de processamento, o que, por si só, poderia inviabilizar esse tipo de aplicação. Desta forma, é necessário desenvolver algoritmos mais eficientes para o processamento dessas rotas. Uma das formas possíveis de melhoria de desempenho de algoritmos é fazer uso do paralelismo para esse fim.

## 1.3 Hipótese

Um método de planejamento de rotas dinâmicas entre veículos permite a obtenção de rotas ótimas, que se trata da melhor rota possível, e rotas subótimas alternativas, que são rotas boas o bastante de acordo com alguma métrica, computacionalmente viáveis em termos de tempo de processamento e com qualidade, considerando medidas de qualidade como níveis de congestionamento, emissão de CO<sub>2</sub>, consumo de combustível e tempo de viagem.

## 1.4 Objetivos

O objetivo principal dessa pesquisa é um planejamento dinâmico de rotas e colaborativo entre veículos, com compartilhamento de informações através de VANETs, computacionalmente

viável e que apresente resultados de qualidade de rota baseada em níveis de congestionamento, consumo de combustível e tempo de viagem satisfatórios para aplicações reais.

### 1.4.1 Objetivos Específicos

Para alcançar os objetivos anteriores, alguns objetivos específicos precisam ser atendidos, a saber:

1. Desenvolver um método colaborativo de planejamento de rotas;
2. Desenvolver e/ou adaptar algoritmos para obtenção de rotas;
3. Definir uma arquitetura de validação de algoritmos de planejamento de rota;
4. Avaliar o desempenho de soluções algorítmicas para o estabelecimento de rotas.

## 1.5 Escopo Negativo

Esse trabalho objetivou a validação do modelo desenvolvido através de experimentos de simulações. Não foram realizados experimentos com veículos reais, ou em modelos de dimensões reduzidas. É importante apresentar o que não pode ser considerado como objetivo deste trabalho. Em primeiro lugar, não foi objetivo apresentar uma solução que possa ser utilizada em todos os casos, levando em consideração as características de um escopo particular, além disso, podem existir requisitos específicos que não foram tratados nesse trabalho.

## 1.6 Método

Esta Seção apresenta a metodologia utilizada para a realização desse trabalho. Os procedimentos metodológicos objetivam identificar os processos e atividades realizados para estudar e resolver um determinado problema. Para realização dessa pesquisa foram realizadas as escolhas metodológicas que são resumidas na Tabela 1.

Tabela 1 – Resumo das escolhas metodológicas

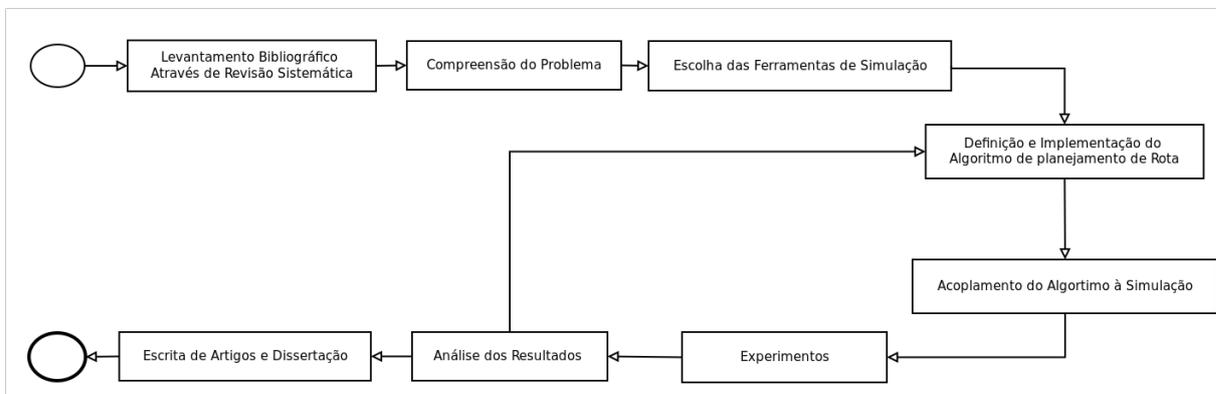
<b>Quanto à/ao</b>	<b>Classificação</b>
Natureza	Aplicada
Objetivos	Exploratória
Abordagem	Quantitativa
Procedimentos	Pesquisa Bibliográfica e Experimental
Método	Hipotético-dedutivo e Experimental

Como apresentado na Tabela 1, a pesquisa foi classificada como segue. Quanto a natureza, a pesquisa foi classificada como aplicada, foi almejado o desenvolvimento de produtos e/ou

processos aplicados ao tema da pesquisa. Quanto aos objetivos, a pesquisa foi classificada como exploratória, pois a finalidade foi obter mais informações sobre o tema através de um mapeamento sistemático e a construção de experimentos para validar as soluções obtidas. Quanto a abordagem, a pesquisa foi classificada como qualitativa e quantitativa, pois foi realizada uma análise sobre os estudos relacionados ao tema que foram encontrados durante o mapeamento sistemático. Já quanto aos procedimentos, a pesquisa pôde ser classificada como pesquisa bibliográfica e pesquisa experimental. Pesquisa bibliográfica devido à natureza do mapeamento sistemático realizado, e experimental, pois as soluções e algoritmos propostos foram validados através de experimentos, alterando e observando valores de parâmetros a fim de checar seus impactos no objeto de estudo. Quanto ao método, a pesquisa foi classificada como hipotético-dedutivo e experimental. Hipotético-dedutivo pois foi conjecturado que um serviço de planejamento de rotas executado através de uma rede VANET é eficaz e eficiente, considerando a hipótese de que a paralelização dos algoritmos de planejamento de rota os tornariam mais eficientes, e experimental pois a hipótese foi validada através de experimentos de simulação.

Após definidas as escolhas metodológicas, foram estabelecidas as etapas que compreendem o método aplicado à realização desta pesquisa, a fim de alcançar os objetivos desejados. A sequência das etapas é como apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Etapas da pesquisa



Para alcançar os objetivos deste estudo foram apresentadas oito etapas sequenciais, que correspondem a(ao): levantamento bibliográfico através de mapeamento sistemático, compreensão do problema, escolha das ferramentas de simulação, definição e implementação de algoritmos de planejamento de rota, acoplamento dos algoritmos à simulação, realização dos experimentos, análise dos resultados e escrita de artigos e documento de dissertação. Na etapa de acoplamento do algoritmo à simulação um módulo de roteamento foi desenvolvido para permitir a avaliação de múltiplos algoritmos, esse processo está descrito na Seção 4.1.

No desenvolvimento desse trabalho foram utilizadas as pesquisas bibliográficas, quantitativa e experimental. Na pesquisa bibliográfica foi verificado o estado da arte em trabalhos sobre os algoritmos de planejamento de rotas. Tendo em vista as respostas à questão de pesquisa

01, mostrada na Figura 10, que elenca as ferramentas de simulação utilizadas na validação das soluções propostas pelos trabalhos da MSL, as ferramentas de simulação utilizadas foram OMNET++, SUMO e VEINS, pois são ferramentas já validadas e foram elencadas como as mais utilizadas pela comunidade científica na MSL realizada.

Como nesta pesquisa foi feita uma análise de desempenho de algoritmos e do sistema viário avaliado, que é considerada para Jain (1990) uma métrica essencial para fundamentar pesquisas científicas, seguindo o autor, será descrita de forma detalhada as etapas da metodologia da avaliação de desempenho, avaliando a modelagem proposta para ser simulada. Jain estruturou a avaliação de desempenho e o planejamento de experimentos da seguinte forma:

- Definir objetivos e escopo do sistema de roteamento;
- Listar serviços e saídas;
- Selecionar métricas de desempenho;
- Listar parâmetros;
- Selecionar fatores para estudo;
- Selecionar técnica de avaliação;
- Selecionar carga de trabalho;
- Projetar experimentos;
- Analisar e interpretar dados dos resultados.

O escopo desse trabalho engloba o desenvolvimento de uma arquitetura de simulação e avaliação de estratégias de roteamento de veículos utilizando redes VANETs para compartilhamento de informações, e capaz de dar suporte à algoritmos paralelos de roteamento. Para tanto, foi desenvolvido um módulo de roteamento que realiza o papel de interface entre os algoritmos de planejamento de rotas e as ferramentas de simulação. O módulo recebe da infraestrutura de comunicação informações sobre o estado das vias e dos veículos, que são utilizados no processo de tomada de decisão dos roteamentos.

Dessa forma, as saídas do sistema são as rotas replanejadas levando em consideração características dinâmicas inerentes ao sistema. As métricas de desempenho obtidas junto às simulações para avaliação dos resultados são: tempo médio de processamento dos algoritmos seriais e paralelo; tempo perdido pelos veículos ao se deslocarem pelos trajetos fornecidos; tempo de atraso de partida; duração da simulação; comprimento da rota; duração média das viagens; e, taxa de atualizações do simulador.

Os parâmetros do sistema são elementos cuja variação podem afetar no desempenho daquele. O parâmetro adotado foi o fluxo de entrada de veículos, que foi definido como a razão

entre a quantidade de veículos que entram no sistema de tráfego por unidade de tempo. A quantidade de vias presentes na simulação foi mantida estática em todas as simulações realizadas, uma vez que, para intervalos de tempo pequenos (neste caso, horas ou dias), a quantidade e posição das ruas não costumam se alterar. Já a variação na quantidade de veículos potencialmente afeta a dinâmica e métricas de desempenho do sistema observado.

Os fatores de estudo se referem à análise do impacto da variação dos parâmetros do sistema sobre o desempenho dele, considerando as métricas selecionadas. Esse trabalho buscou avaliar o impacto de reprocessamentos coordenados de rotas frente às métricas supracitadas, bem como comparar implementações seriais e paralelas de algoritmos de planejamento de rotas sob ponto de vista do desempenho computacional. A técnica de simulação foi adotada como estratégia para modelagem computacional, capacitação e avaliação dos métodos de planejamento de rotas propostos pois, na simulação, as variáveis do sistema apresentam comportamentos semelhantes ao ambiente real.

## **1.7 Organização do Trabalho**

O Capítulo 2 apresenta os resultados obtidos no processo de mapeamento sistemático. O Capítulo 3 apresenta trabalhos relacionados sobre os assuntos relevantes à pesquisa. O Capítulo 4 aborda a metodologia adotada para o desenvolvimento do trabalho. No Capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos através dos experimentos realizados. No Capítulo 6 foram apresentadas as conclusões desse trabalho, além de indicações de lacunas para trabalhos futuros.

# 2

## Mapeamento Sistemático

Neste capítulo são apresentados os resultados de um Mapeamento Sistemático da Literatura (MSL) para o problema de planejamento de rotas veiculares utilizando redes VANETs. O processo de mapeamento sistemático da literatura difere de uma revisão bibliográfica. Enquanto uma revisão bibliográfica é uma busca geralmente não estruturada por trabalhos relacionados, no mapeamento sistemático existe um protocolo de busca bem definido, de forma que outros pesquisadores, ao seguir os passos definidos pela mapeamento, devem ser capazes de encontrar os mesmos resultados.

De acordo com (PETERSEN et al., 2008), a revisão sistemática consiste em definir questões de pesquisa, que abrangem o escopo de interesse da revisão, realizar buscas em bases de artigos científicos para obtenção dos estudos primários e filtrar os estudos com base no tema de interesse. De posse dos artigos, é necessário selecionar os artigos relevantes às questões de pesquisa definidas e realizar uma leitura cuidadosa a fim de obter as respostas para as questões de pesquisa e apresentar as análises dos resultados obtidos. O mapeamento sistemático, assim como a revisão sistemática, segue um protocolo de buscas, diferindo apenas na profundidade do estudo. Enquanto a revisão sistemática busca analisar o efeito de variáveis, e fazer uma síntese de causa e efeito, o mapeamento sistemático busca construir uma visão geral dos trabalhos que tratam de determinado tema.

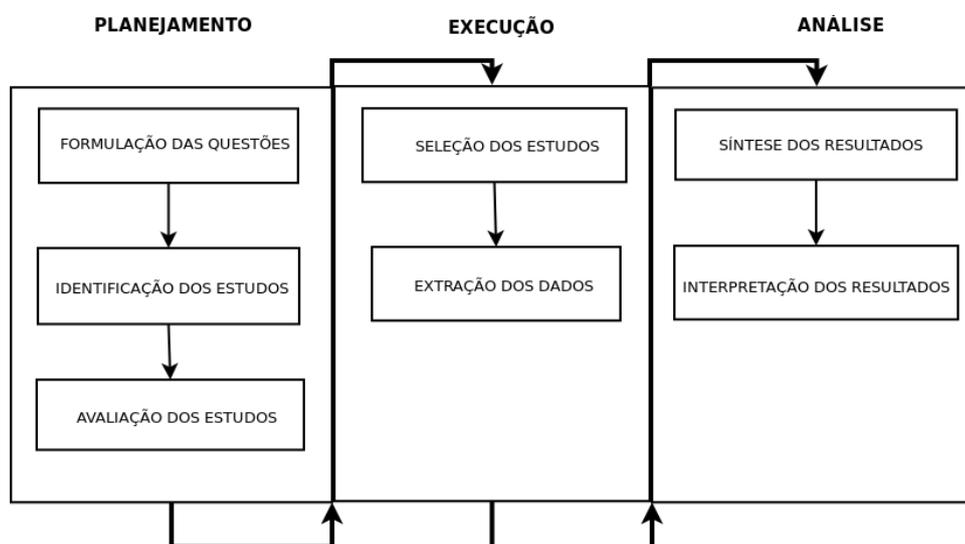
É importante diferenciar mapeamento sistemático de revisão sistemática. As características do mapeamento são mais quantitativas, amplas e geralmente sumarizadas em gráficos, enquanto as características da revisão sistemática são mais qualitativas, com análises críticas descritivas, minuciosas e profundas, visando elucidar novas evidências e aspectos relevantes através do resumo dos estudos selecionados.

Este Capítulo descreve como foi realizado o método da busca, seleção dos artigos e quais critérios foram utilizados na filtragem dos artigos. Por meio de um MSL é possível identificar, avaliar e interpretar todos os trabalhos disponíveis relevantes para uma determinada questão de

pesquisa, área de tópico ou fenômeno de interesse. Estudos individuais que contribuem para um mapeamento sistemático são chamados estudos primários.

Há várias razões que justificam a realização de um mapeamento sistemático. De forma breve, pode-se dizer que através dele é possível resumir evidências sobre determinada área, identificar lacunas para mais investigação e fornecer uma estrutura para novas atividades de pesquisa. Vale ainda ressaltar que a condução do mapeamento sistemático deve ser realizada de forma justa, seguindo uma estratégia de pesquisa pré-definida, que permita avaliar a integridade da pesquisa e identificar quais apoiam ou não as suas hipóteses (KITCHENHAM, 2004).

Figura 3 – Fases de um mapeamento sistemático

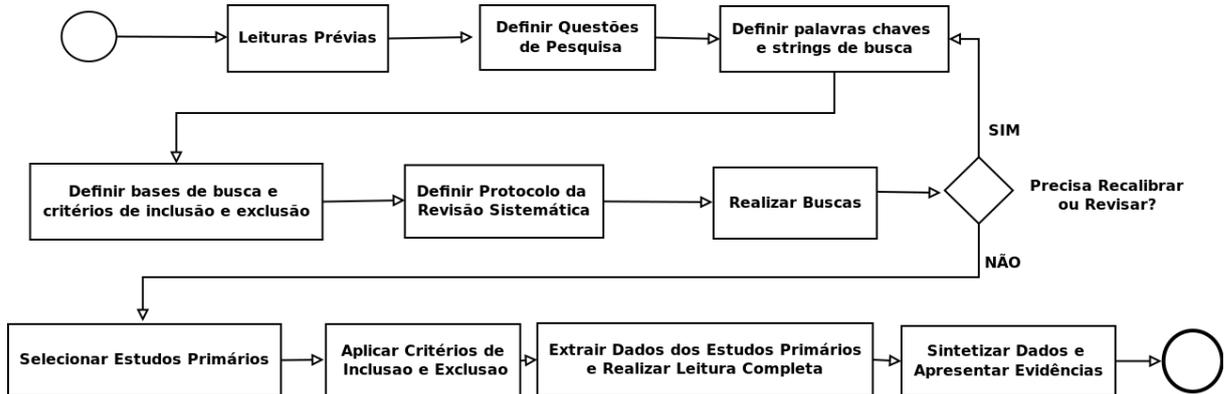


Como observado na Figura 3, a MSL é constituída das fases de planejamento, execução e análise. Na fase de planejamento devem ser elaboradas as questões de pesquisa para análise dos estudos primários, a seleção das bases onde as buscas serão realizadas e a definição das *strings* de busca que serão utilizadas. Na fase de execução, as buscas utilizando as *strings* de busca são realizadas, além disso, a filtragem dos estudos primários considerando os critérios de inclusão e exclusão é feita. Na fase de análise, os dados são sintetizados para responder as questões de pesquisa e um resumo dos trabalhos selecionados é realizado.

## 2.1 Planejamento

Na fase de planejamento o protocolo do mapeamento sistemático é criado, são definidos os objetivos do trabalho, as hipóteses de pesquisa, as questões de pesquisa, as bases de buscas que serão utilizadas, as *strings* de busca que serão utilizadas e os critérios de inclusão e exclusão. A Figura 4 apresenta as etapas do protocolo definido.

Figura 4 – Passos executados na revisão sistemática



### 2.1.1 Questões de Pesquisa

O passo inicial foi definir a área de interesse da pesquisa. Foi feita a opção de fechar o escopo em planejamento de rotas para veículos autônomos (automóveis), a aplicação de métodos de planejamento de rotas em *Traffic Management System - TMS*. Para orientar o estudo foram definidas algumas questões de pesquisa, tendo em vista que essas questões, ao serem respondidas fortaleceriam o conhecimento teórico e as características experimentais necessárias para validar as soluções. Foram criadas três questões de pesquisa baseadas na hipótese apresentada na Seção 1.1.2 e replicada a seguir:

**Hipótese** - Um método de planejamento de rotas dinâmicas entre veículos permite a obtenção de rotas ótimas (a melhor rota possível) e rotas subótimas alternativas (que são rotas boas o bastante de acordo com alguma métrica), computacionalmente viáveis em termos de tempo de processamento e com qualidade, considerando medidas de qualidade como níveis de congestionamento, emissão de CO<sub>2</sub>, consumo de combustível e tempo de viagem.

Para aprofundar no tema, a MSL buscou responder as questões de pesquisa apresentadas na Tabela 2:

Tabela 2 – Questões de pesquisa

#	Questões de Pesquisa
QP1	Foram utilizadas ferramentas de simulação na validação da solução avaliada? Quais?
QP2	Quais métricas foram utilizadas para medir a qualidade da solução avaliada?
QP3	Algum método ou etapa de planejamento de rotas é proposto? Qual? Qual algoritmo é utilizado?

### 2.1.2 Estratégias de Buscas

A partir das questões de pesquisas e de leituras prévias de trabalhos, foram definidas as palavras-chave e seus sinônimos para compor a *string* de buscas. A *string* foi construída utilizando operadores lógicos AND e OR para aumentar e restringir o escopo das buscas. Foram realizados testes de buscas para calibração da *string*. A *string* de busca é apresentada na Tabela 3 a seguir:

Tabela 3 – String de busca

#	<i>strings</i>
Inglês	(( <i>"path planning"</i> OR <i>"route planning"</i> OR <i>"dynamic route planning"</i> ) AND ( <i>"VANET"</i> OR <i>"vehicular network"</i> ))

### 2.1.3 Bases de Busca

As escolhas das bases de dados se deram considerando a relevância desses repositórios para a pesquisa. Também foi objetivo obter a maior cobertura possível de resultados relacionados. Todas as buscas foram realizadas através da Internet, a partir dos portais de busca disponibilizados pelas bases de trabalhos. Alguns desses portais de busca forneciam ferramentas melhores de busca, a possibilidade de implementar filtros mais avançados, enquanto outros não possibilitaram buscas com expressões lógicas, nesses casos, as palavras chaves foram buscadas uma a uma. Não foram considerados intervalos de datas específicas, já que o roteamento de veículos em si é um problema clássico da literatura. As bases escolhidas são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Bases de busca

Fontes de Busca	URL
Scopus	<a href="https://www.scopus.com">https://www.scopus.com</a>
IEEE Xplorer	<a href="http://ieeexplore.ieee.org">http://ieeexplore.ieee.org</a>
Elsevier	<a href="http://www.sciencedirect.com/">http://www.sciencedirect.com/</a>
Springer Link	<a href="https://link.springer.com/">https://link.springer.com/</a>
ACM Digital Library	<a href="https://dl.acm.org/">https://dl.acm.org/</a>

### 2.1.4 Critérios de Inclusão e Exclusão

Os critérios de inclusão e exclusão devem servir para classificar os estudos primários e definir quais devem ser considerados ou não nas etapas subsequentes do processo de mapeamento sistemático. Eles devem ser bem definidos para possibilitar uma classificação confiável e replicável. Os critérios de inclusão e exclusão definidos nessa MSL são apresentados nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5 – Critérios de inclusão

#	Critérios de Inclusão
1	Os estudos devem ser trabalhos completos.
2	Os estudos devem estar disponíveis na <i>web</i> .
3	Os estudos devem ter sido publicados em <i>journals</i> , simpósios ou conferências das bases citadas.

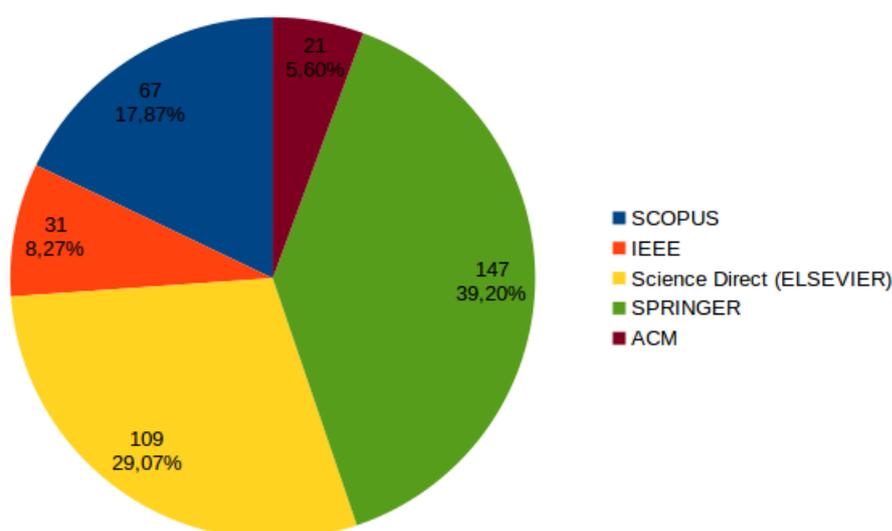
Tabela 6 – Critérios de exclusão

#	Critérios de Exclusão
1	Estudos duplicados.
2	Estudos não disponíveis através do sítio Periódicos Capes ou <i>Web</i> .
3	Trabalhos resumidos ou teóricos.
4	Estudos que não abordem o planejamento de rotas veiculares usando redes VANETs como tema ou es

## 2.2 Execução

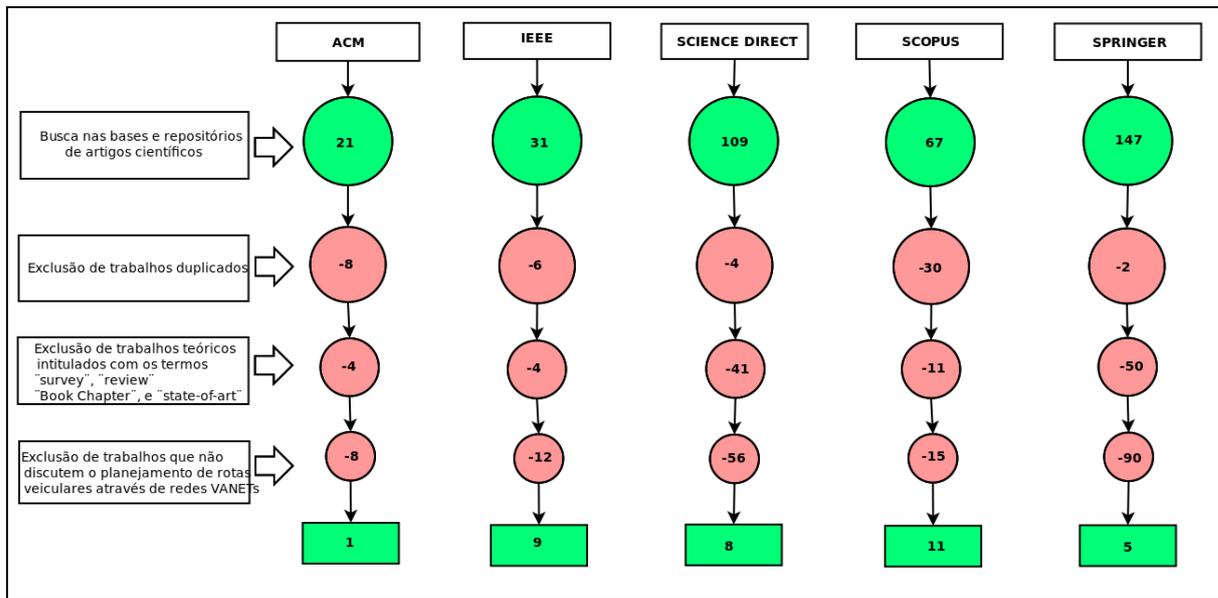
A fase de execução compreende a seleção de estudos e extração dos dados. A definição do protocolo desse mapeamento sistemático foi iniciado em junho de 2017, já as fases de busca, leitura e seleção dos trabalhos ocorreram de agosto de 2017 à setembro de 2018, portanto, esse capítulo não pode elencar trabalhos tornados públicos após setembro de 2018. As buscas na base IEEE xplora resultou em 31 trabalhos, na base ACM foram 21, Scopus resultou em 67 trabalhos, na Springer Link foram encontrados 147 trabalhos e na Science Direct (Elsevier) foram encontrados 109 artigos. Esses resultados são apresentados na Figura 5.

Figura 5 – Trabalhos encontrados por base de busca



Considerando o universo de trabalhos resultante das buscas de 375 estudos encontrados nas bases pesquisadas, após a exclusão dos trabalhos duplicados, ou seja, a aplicação de um dos critérios de exclusão, restaram 325 estudos. A Figura 6 mostra a quantidade de trabalhos

Figura 6 – Filtros de Trabalhos



excluídos da execução após a aplicação de cada um dos critérios de exclusão por base pesquisada. Após a aplicação do terceiro critério de exclusão, remoção dos trabalhos puramente teóricos, restaram 215 estudos a serem analisados. Esses estudos tiveram seus resumos lidos durante a aplicação do último critério de exclusão, e os estudos que não tratavam do tema de interesse, isto é, planejamento de rotas para veículos utilizando informações compartilhadas através de VANETS, foram excluídos. Restaram 34 trabalhos a serem completamente lidos e utilizados na obtenção de respostas para as questões de pesquisa.

### 2.3 Análise

Na fase de análise a intenção é sintetizar os dados, apresentar e analisar os resultados a fim de encontrar evidências de que os estudos atendem aos propósitos do mapeamento sistemático, ou seja, que respondam ao menos uma das questões de pesquisa. Nessa fase, todos os trabalhos que passaram nas fases de inclusão e exclusão foram lidos. Os trabalhos selecionados após essa leitura podem ser vistos na Tabela 7.

Tabela 7 – Estudos primários selecionados

ID	Ano	Título
S01	2009	Evaluation of VANET-Based Advanced Intelligent Transportation System
S02	2010	Dynamic Route Planning in Vehicular Networks Based on Future Travel Estimation
S03	2013	Impact of VANET-Based V2X Communication using IEEE 802.11p on Reducing Vehicles Traveling Time in Realistic Large Scale Urban Area

- 
- S04 2018 Real-Time Path Planning in Urban Area via VANET-Assisted Traffic Information Sharing
- S05 2015 Real-time Path Planning Based on Hybrid-VANET-Enhanced Transportation System
- S06 2015 Decentralized RSU-Based Real-Time Path Planning for Vehicular ad-hoc Networks
- S07 2016 On Design of a Dynamic Carpooling System Based on Vehicle Information Shared Through the VANET
- S08 2015 Detecting Urban Road Condition and Disseminating Traffic Information by VANETs
- S09 2016 Autonomous Vehicles Safe-optimal Trajectory Selection Based on Big Data Analysis and Predefined User Preference
- S10 2014 A two-purpose peer-to-peer structure for vehicle navigating and traffic information disseminating in vehicular networks
- S11 2014 Transportation Routing in Urban Environments Using Updated Traffic Information Provided through Vehicular Communications
- S12 2018 ABSCEV: An agent-based simulation framework about smart transportation for reducing waiting times in charging electric vehicles
- S13 2017 A cooperative route choice approach via virtual vehicle in IoV
- S14 2014 CaRINA Intelligent Robotic Car: Architectural design and applications
- S15 2010 On the feasibility of UMTS-based Traffic Information Systems
- S16 2016 Anytime route planning with constrained devices
- S17 2014 Application of cellular automata and type-2 fuzzy logic to dynamic vehicle path planning
- S18 2016 Balanced traffic routing: Design, implementation, and evaluation
- S19 2014 A trust-based framework for vehicular travel with non-binary reports and its validation via an extensive simulation testbed
- S20 2017 Autonomic Navigation System Based on Predicted Traffic and VANETs
- S21 2018 A traffic congestion aware vehicle-to-vehicle communication framework based on Voronoi diagram and information granularity
- S22 2017 Applying location estimation for reliable routing in tactical unmanned ground vehicle networks
- S23 2006 Hovering Data Clouds: A Decentralized and Self-organizing Information System
- S24 2018 DIFTOS: A distributed infrastructure-free traffic optimization system based on vehicular ad hoc networks for urban environments
- S25 2018 Investigating the impact of real-time path planning on reducing vehicles traveling time

---

S26	2018	SAINT+: Self-Adaptive Interactive Navigation Tool+ for Emergency Service Delivery Optimization
S27	2018	FGWSO-TAR: Fractional glowworm swarm optimization for traffic aware routing in urban VANET
S28	2018	Accident Management System Based on Vehicular Network for an Intelligent Transportation System in Urban Environments
S29	2016	Seeing Is Believing: Sharing Real-Time Visual Traffic Information via Vehicular Clouds
S30	2015	Accurate real-time traffic speed estimation using infrastructure-free vehicular networks
S31	2013	A VANET-based A* route planning algorithm for travelling time and energy-efficient GPS navigation app
S32	2013	Using the mimo mechanism to integrate vehicle information process systems in vehicular networks
S33	2012	MICE: A real-time traffic estimation based vehicular path planning solution using VANETs
S34	2011	Bidirectionally coupled network and road simulation for improved IVC analysis

---

## 2.4 Resultados da Análise

Aqui são apresentados os resultados quantitativos das bases de buscas, ano das publicações, tema de interesse e questões de pesquisa que foram obtidos através da extração de dados dos 34 artigos que atenderam aos critérios do processo e ficaram na etapa final do mapeamento sistemático.

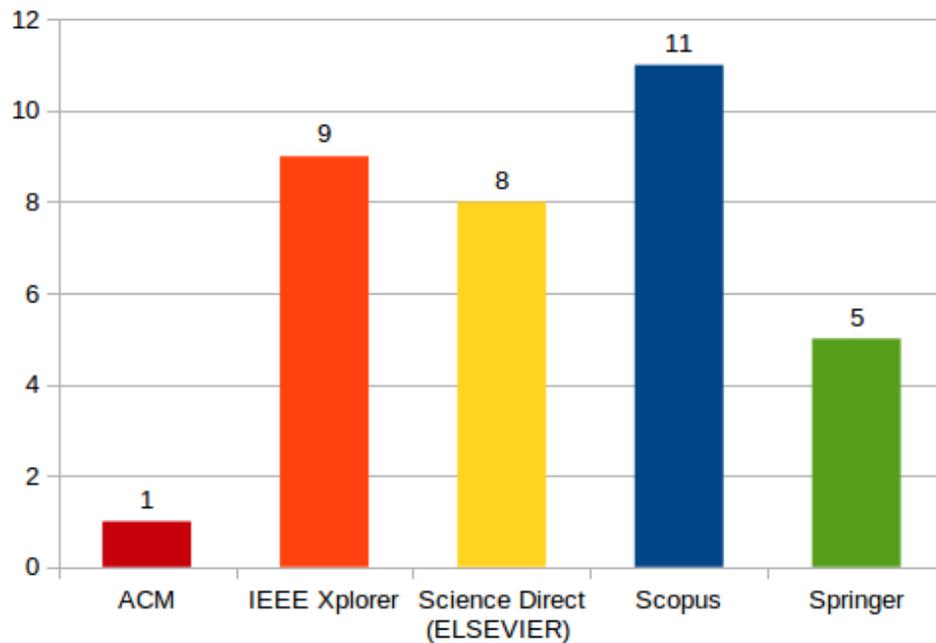
### 2.4.1 Base dos Trabalhos

A Figura 7 apresenta o total de estudos selecionados para extração de dados por base de busca após a aplicação dos filtros. Nota-se que a maioria dos trabalhos são da base Scopus (11 trabalhos), com representatividade de 32,35% do total, seguida pela IEEE xplora com 26,48% (9 artigos), e pela Science Direct (Elsevier) com 23,53% (8 artigos do total). A base Springer Link apresentou 5 trabalhos, 14,70%, e por último a ACM que só teve 2,94%, com apenas 1 artigo.

### 2.4.2 Ano das Publicações

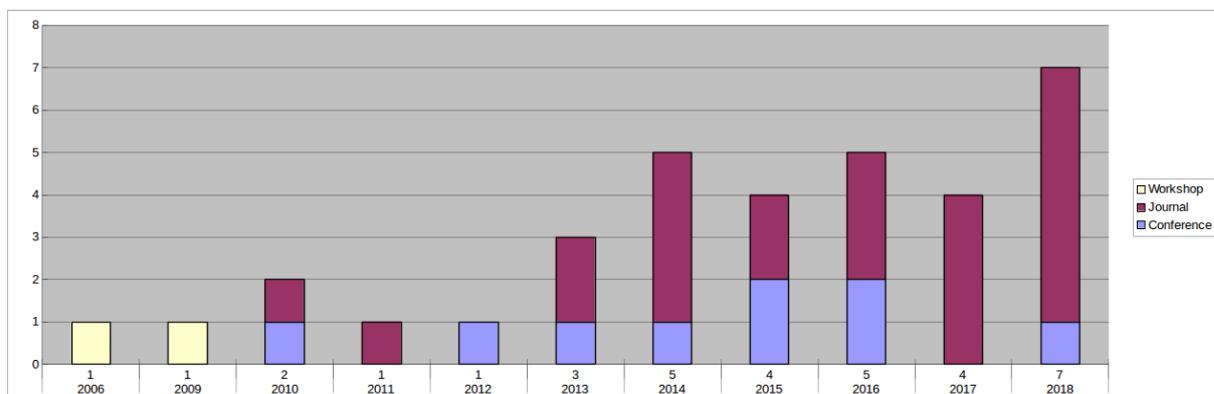
Foi feito um estudo acerca do ano e meio das publicações, ilustrado na Figura 8. Observa-se que o estudo mais antigo aqui selecionado refere-se ao ano de 2006, e a partir deste ano, até 2018 houve trabalhos selecionados, exceto pelos anos 2007 e 2008. A maioria dos estudos foram

Figura 7 – Quantidade de trabalhos selecionados por base de busca



publicados de 2014 à 2018, 25 artigos, o que representa 73.52% do total. De 2006 à 2013 foram encontrados 9 trabalhos, 26.48% do total de trabalhos resultantes desse mapeamento. A Figura 06 mostra que os temas aqui abordados foram pouco considerados de 2006 a 2012, havendo maior interesse da comunidade científica entre 2013 a 2018. Houve um intervalo de anos em que não foram encontrados trabalhos sobre o tema, de 2007 a 2008. É possível concluir que estão sendo feitos esforços para atender as necessidades de planejamento de rotas para veículos utilizando VANETs, isso pode ser justificado pelo crescimento no interesse em pesquisas que tratam de temas das *smart cities*. No entanto, a tecnologia ainda é considerada imatura e apresenta-se em fase de crescimento, o que oferece inúmeras possibilidades de oportunidades de pesquisa para problemas em aberto ou otimização de soluções existentes.

Figura 8 – Quantidade de trabalhos selecionados por ano de publicação

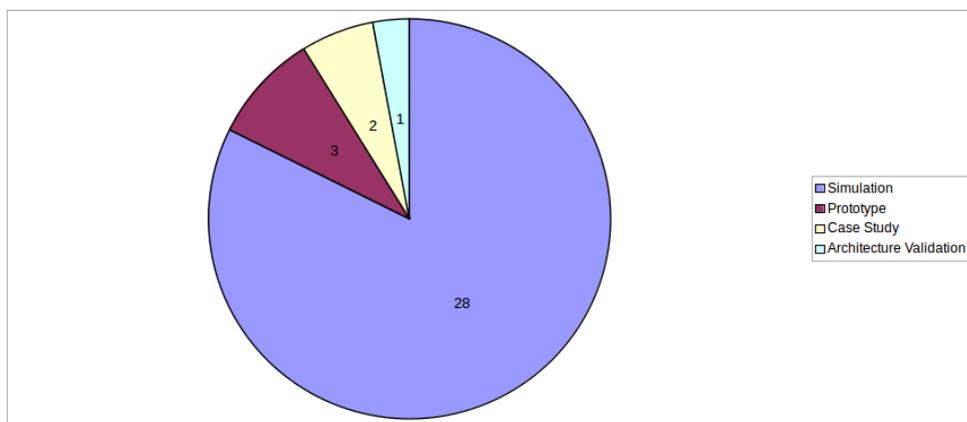


## 2.5 Respostas às Questões de Pesquisa

### 2.5.1 Foram utilizadas ferramentas na validação da solução avaliada? Quais?

A questão de pesquisa 01 objetiva verificar quais métodos são comumente utilizados em validações de soluções propostas em trabalhos científicos sobre o tema de planejamento de rotas para veículos compartilhando informações através de VANETs. Além disso, quais ferramentas são utilizadas com essa finalidade. As repostas dessa questão de pesquisa mostraram ferramentas de simulação bem reconhecidas na comunidade acadêmica para compor as etapas experimentais de soluções propostas.

Figura 9 – Quantidade de trabalhos por tipo de validação experimental

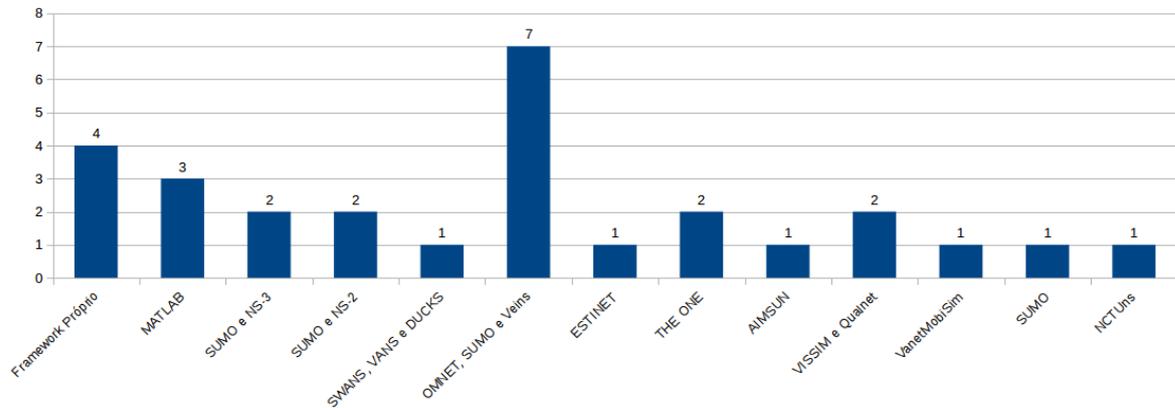


A Figura 9 mostra quais tipos de validação experimental apareceram nos trabalhos selecionados nesse mapeamento sistemático. Apenas um trabalho realizou a validação de uma arquitetura proposta. Dois trabalhos realizaram estudos de caso sobre conjunto de dados abertos. Três trabalhos selecionados desenvolveram protótipos de veículos e dispositivos computacionais para o planejamento de rota. Mas, a maioria dos trabalhos utilizaram simulação para validar suas soluções, isso ocorre, principalmente, porque é custoso realizar experimentos em um ambiente real considerando os cenários de cidades e veículos automotivos. Dessa forma, as ferramentas de simulação reduzem as dificuldades experimentais em termos de infraestrutura necessária.

Considerando os resultados obtidos acerca da incidência de validações experimentais realizadas utilizando ferramentas de simulação, foram verificadas quais ferramentas, ou conjunto de ferramentas, eram mais utilizadas nos trabalhos selecionados pelo mapeamento. A Figura 10 mostra quais ferramentas de simulação foram verificadas em trabalhos que utilizaram esse modo de validação experimental. É possível verificar que, em muitos dos casos, mais de uma ferramenta de simulação são utilizadas de maneira conjunta, essa é uma prática comum na área devido à complexidade de se trabalhar com duas áreas distintas de pesquisa, mobilidade e redes de comunicação, então, na busca de ferramentas que cumpram bem com os dois papéis os autores utilizam ferramentas acopladas. É possível notar que as ferramentas de simulação acopladas:

SUMO, OMNET++ e Veins são as mais utilizadas, segundo o mapeamento sistemático realizado, mostrando a aceitação desse conjunto de simuladores pela comunidade científica.

Figura 10 – Ferramentas de simulação utilizadas



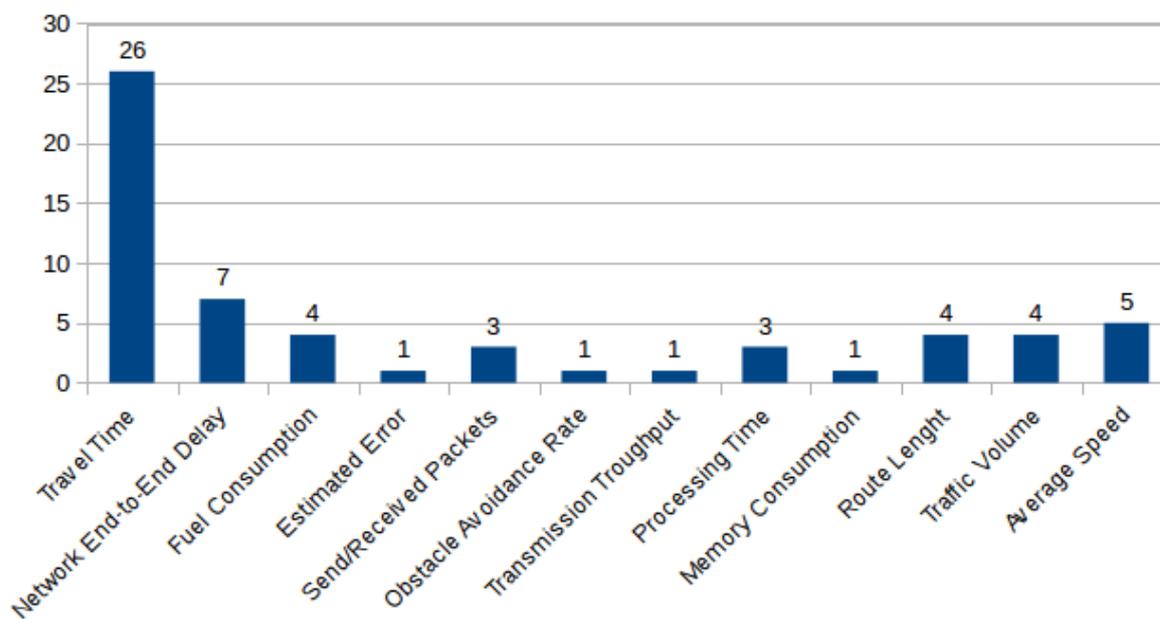
## 2.5.2 Quais métricas foram utilizadas para medir a qualidade da solução avaliada?

A questão de pesquisa 02 objetiva verificar quais são as métricas de qualidade das soluções propostas nos trabalhos científicos encontrados no mapeamento sistemático. As repostas para essa questão de pesquisa mostram quais métricas são mais discutidas pelos trabalhos relacionados, assim é possível comparar as soluções. A Figura 11 mostra uma síntese das métricas de qualidade de solução que foram verificadas nesse mapeamento sistemático. O total de incidências das métricas é superior ao total de trabalhos porque a maioria dos estudos selecionados buscaram avaliar mais de uma métrica.

A maioria dos autores buscaram minimizar o tempo de viagem dos veículos do sistema através do planejamento de rotas, o que reflete um objetivo intuitivo de um trânsito planejado, essa foi uma das métricas para 26 estudos. A segunda métrica mais avaliada foi o atraso de rede inerente às soluções propostas, alguns dos trabalhos propuseram seus próprios métodos de disseminação de pacotes em redes VANETs, justificando essa incidência, assim como a incidência da métrica de pacotes enviados e recebidos. Outros estudos se preocuparam em reduzir o comprimento dos trajetos e aumentar a velocidade média dos veículos do sistema.

Métricas incomuns como: vazão de transmissão, erro estimado e taxa de desvio de obstáculos também apareceram, alguns desses casos se dão por conta da natureza específica do problema atacado no trabalho, por exemplo planejamento de rota para fugas em catástrofes. Outros casos se dão devido à especificidade da solução proposta.

Figura 11 – Métricas avaliadas nos trabalhos



### 2.5.3 Algum método ou etapa de planejamento de rotas é proposto? Qual? Qual algoritmo é utilizado?

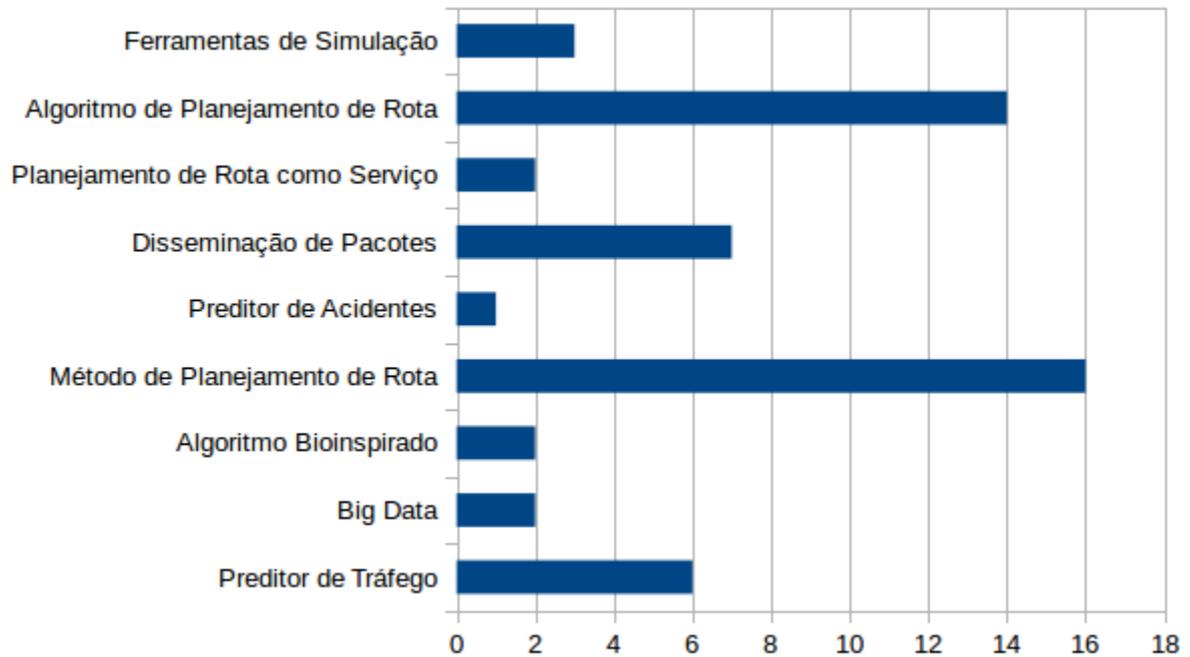
Todos os trabalhos responderam a questão de pesquisa 03, alguns trabalhos propuseram novos algoritmos de planejamento de rotas, outros propuseram novas técnicas para etapas específicas do processo, como aquisição de dados e disseminação de mensagens. A Figura 12 apresenta, simplificada, a natureza das abordagens propostas nos trabalhos. A maioria dos trabalhos propuseram métodos de planejamento de rotas, isso é, não apenas um algoritmo de planejamento, mas procedimentos e estruturas de obtenção de dados, disseminação de mensagens, e processos para obtenção do planejamento de rota.

Em seguida, 16 trabalhos propuseram algoritmos de planejamento de rotas, como exemplos, o S26 propôs o algoritmo *Delay-constrained Shortest Path algorithm* (DSP), o S27 propôs o FGWSO-TAR, o S25 usou uma melhoria do *Bellman-Ford Shortest Path algorithm*, o S14 implementou uma variação do algoritmos A\* chamado *Anytime Dynamic A\**, o S02 utilizou o algoritmo *Dijkstra Algorithm Clairvoyant*, baseado na predição do tempo de viagem. Os estudos S07 e S31 utilizaram o algoritmo Vanet-Based A\* (VBA\*). Todos esses trabalhos e suas soluções estão melhor explicados no Capítulo 3 - Trabalhos Relacionados.

Alguns trabalhos utilizaram algoritmos bioinspirados no planejamento de rota para os veículos, dois deles utilizaram otimização de colônia de formigas (ACO - *Ant Colony Optimization*). Alguns trabalhos propuseram etapas ou ferramentas do processo de planejamento de rota, 6 trabalhos implementaram preditores de tráfego e outros 7 trabalhos implementaram e analisaram técnicas de disseminação de pacotes para comunicar relatórios do trânsito. Foram

encontrados trabalhos que trataram o problema com abordagem de multi-agentes, tratando do planejamento de rota como um serviço de nuvem, propondo, inclusive, preditores de acidente com base em *Big Data*.

Figura 12 – Tipos de soluções apresentadas



Considerando os resultados do mapeamento sistemático, foi feita a opção por utilizar as ferramentas de simulação: SUMO, OMNET++ e Veins. Também foi constatado o interesse por métodos e algoritmos de planejamento de rotas, parte do problema tratado nesse trabalho.

# 3

## Trabalhos Relacionados

Neste capítulo são abordados os trabalhos relacionados com esse trabalho. Os trabalhos apresentados são resultantes do Mapeamento Sistemático da Literatura - MSL realizado. Todos os trabalhos apresentados como resultados do MSL se relacionam com a dissertação de alguma forma, seja pelo uso de VANETs para disseminação de informações, ou pelo desenvolvimento de um sistema de gerenciamento de trânsito.

Foram encontrados trabalhos com abordagens únicas nesse MSL. No trabalho (LEI et al., 2017), os autores aplicaram o conceito de *virtual vehicles* na *Internet of Vehicles*, que seria uma imagem do veículo e motorista. Os veículos virtuais atuam em cooperação através do jogo de concessão estratégica para minimizar o tempo de viagem individual e total do sistema. Já no trabalho (WANG et al., 2015), os autores propuseram um sistema de planejamento de rotas em tempo real utilizando redes VANETs e redes celulares. O estudo propôs o uso da técnica de otimização estocástica de Lyapunov para reduzir o tempo de viagem de veículos conectados em rede. Os experimentos foram realizados através de simulação utilizando a ferramenta VISSIM.

Nos trabalhos de (SOMMER et al., 2010) e (SOMMER; GERMAN; DRESSLER, 2011), os autores desenvolveram uma ferramenta nomeada de VEINS. Essa ferramenta acopla o simulador de rede OMNET++ e o simulador de tráfego SUMO, possibilitando a comunicação entre as duas, fazendo com que eventos da simulação de redes possam desencadear eventos na simulação de tráfego e vice-versa. A prova de conceito da ferramenta foi realizada com uma aplicação de notificação de acidentes e redirecionamento de tráfego para evitar congestionamentos. Em (YANG; BAGRODIA, 2009), os autores propuseram uma ferramenta distribuída de simulação que integra simulação de transporte e simulação de redes sem fio através da comunicação entre os simuladores VISSIM E Qualinet. A ferramenta foi validada através de experimentos de planejamento dinâmico de rotas sobre redes VANETs. Já no trabalho (GARCÍA-MAGARIÑO et al., 2018), os autores tratam da redução do tempo de espera de veículos em filas de recarga de veículos elétricos. O trabalho apresenta um *framework* de simulação dos efeitos de diversas

políticas no planejamento de rota dos veículos elétricos para otimizar sua recarga durante o trajeto. Os resultados mostraram que a abordagem escolhida melhorou o tempo de espera nas estações de recarga e o tempo médio de viagem global. Foram consideradas a quantidade de mensagens trocadas e a quantidade de re-roteamentos realizados.

Já no trabalho (AL-MAYOUF et al., 2018), os autores tiveram como principal objetivo o desenvolvimento de um sistema de gerenciamento de acidentes que fizesse uso de redes veiculares e redes celulares para realizar a comunicação em tempo real entre veículos, ambulâncias e hospitais. O sistema realiza o planejamento de rota dos veículos e ambulâncias para otimizar o tempo de atendimento a acidentes e o roteamento de pacotes para alertar as autoridades sobre os acidentes. Além disso, o sistema é capaz de gerenciar os semáforos para agilizar o atendimento das vítimas.

Muitos dos trabalhos puderam ser agrupados por possuírem tema, foco ou abordagem em comum. Esses trabalhos foram separados em quatro grupos: trabalhos que tratam de modelos de predição, métodos de disseminação, estratégias de roteamento e por tipo de arquitetura adotada. As seções que seguem apresentam esses trabalhos.

### 3.1 Modelos de Predição

Alguns trabalhos focaram em modelos de predição de tráfego para embasar seu roteamento. Em (HE; CAO; LI, 2012), os autores desenvolveram um método preditivo das condições de trânsito utilizando um modelo de fluxo de densidade/velocidade e validaram utilizando um conjunto de dados reais de mobilidade e as ferramentas *Network Simulator 3* (NS3) e SUMO. Já em (HE; CAO; LIU, 2015), os autores propuseram uma abordagem para estimar a velocidade do tráfego utilizando redes veiculares livres de infraestrutura. A solução proposta utiliza um modelo de fluxo de tráfego para estimar as condições do tráfego. O modelo é baseado na densidade de veículos no mapa. O método foi avaliado através da aplicação em planejamento de rotas em tempo real.

Em (THULASIRAMAN; CLARK; BEACH, 2017), os autores propuseram um algoritmo de planejamento de rotas para veículos não tripulados baseado em estimativa de localização de outros veículos. Utilizaram o *Extended Kalman Filter* (EKF) para estimativa de localização e o AODV (*Ad Hoc On Demand Distance Vector*) para seleção de rotas. A solução proposta foi denominada de AODV-LocPred. Em (FONTANELLI; BINI; SANTI, 2010), os autores desenvolveram um algoritmo de planejamento de rotas baseado na estimativa de densidade de veículos nas vias, utilizaram as ferramentas AIMSUN e MATLAB na realização dos experimentos. Já em (YANG et al., 2016), os autores propuseram um sistema autônomo de navegação usando VANETs, utilizaram um algoritmo baseado em predição estimada de tráfego, que foi chamado de *Time-dependent A\**.

## 3.2 Estratégias de Roteamento

### 3.2.1 Algoritmos Bioinspirados

Algoritmos bioinspirados foram utilizados para o planejamento de rotas nos trabalhos analisados. No trabalho (JONG et al., 2013), foi utilizado o algoritmo de colônia de formigas, *Ant Colony Optimization* (ACO). Já no trabalho (HUANG et al., 2014), o conceito de *cellular automata* é utilizado para coletar informações das condições das vias em tempo real e derivar rotas para os usuários. O algoritmo baseado em autômatos celulares é preparado para atender preferências do usuário e balancear o tráfego nas vias. Os resultados foram comparados com os algoritmos A\* e *Hierarchical Voronoi Graph path planning* (HVG). Em (REWADKAR; DOYE, 2018), os autores introduzem o algoritmo FGWSO (*fractional glowworm swarm optimization*) como método de otimização dos veículos de uma rede VANET. O método consegue identificar rotas com menor densidade de veículos e menor tempo de espera em um cenário urbano. O algoritmo é inspirado no comportamento dos enxames de vaga-lumes.

### 3.2.2 Algoritmos de Busca

Além do uso de algoritmos bioinspirados, também foi constatado o uso dos algoritmos Dijkstra, A\* e algumas modificações dos mesmos em muitos trabalhos. No trabalho (LIU et al., 2016), os autores apresentaram um sistema chamado de Themis, que é um sistema de navegação que realiza o planejamento de rotas balanceando o tráfego nas vias. Um aplicativo *mobile* baseado em relatórios do tráfego e popularidade das vias foi desenvolvido. O sistema usa o algoritmo de Dijkstra e planeja rotas alternativas baseado nas informações obtidas no aplicativo.

No trabalho (SALEH; TOFIGH; ZAHRA, 2014), os autores propuseram um mecanismo para roteamento de veículos baseado na disponibilidade de informações do trânsito. O mecanismo inclui duas fases. Na primeira fase é realizada a coleta de informações e armazenamento dos dados em um centro de informações. Na segunda fase, são aplicados dois algoritmos baseados em Dijkstra para planejamento de rota dos veículos. Um dos algoritmos calcula a rota somente uma vez, no início do trajeto, enquanto o outro recalcula a rota várias vezes durante o trajeto.

Como exemplos dos trabalhos que utilizam o algoritmo A\*, ou propõe modificações do mesmo, que foram encontrados nos resultados do MSL, é possível citar (BRAGA et al., 2016), onde os autores realizaram uma prova de conceito com uma aplicação real utilizando ônibus da cidade de Rio de Janeiro. Para isso construíram um protótipo e utilizaram o algoritmo *Anytime Repairing A\** (ARA\*). Obtiveram como medidas de qualidade da aplicação: o comprimento da rota planejada, a velocidade média obtida e memória RAM consumida no protótipo. Já em (CHANG et al., 2013), os autores propuseram um algoritmo A\* modificado para o uso de VANETs, nomearam de *VANET Based A\** (VBA\*). O VBA\* tem o objetivo de reduzir o tempo de viagem e o consumo de combustível dos veículos. Os autores compararam os resultados do algoritmo com outros algoritmos clássicos através de experimentos de simulação

utilizando a ferramenta The ONE. Em (CHANG; HUNG; YEN, 2016), os autores propuseram uma arquitetura, algoritmo e sistema dinâmico de caronas baseado em informações de tempo real sobre os veículos e também utilizaram o VBA\*. A solução calcula a rota com menor consumo de combustível utilizando o algoritmo VBA\* para que o maior número de passageiros sejam atendidos e o consumo de combustível seja reduzido.

Algoritmos provenientes do A\* também foram propostos e avaliados em (NOORI; VALKAMA, 2013). Os autores utilizaram as ferramentas OMNET++, SUMO e Veins para realizar as simulações dos experimentos. Os autores desenvolveram um método de planejamento de rotas que calcula um *Current Travel Time* (CTT) para cada rua em tempo real e calcula dinamicamente as rotas dos veículos baseado no CTT utilizando o algoritmo A\* com algumas heurísticas. Em (FERNANDES et al., 2014), os autores apresentaram os resultados obtidos nos testes de dois protótipos de veículos autônomos construídos. O trabalho propõe uma arquitetura modular e dinâmica para veículos autônomos, avalia o desempenho do planejamento de rotas nos mesmos e analisam a criptografia em redes veiculares através dos protótipos. Esses veículos utilizaram um algoritmo de planejamento de rotas chamado “Anytime Dynamic A\*”, além de visão computacional para ajustes na trajetória.

### 3.3 Métodos de Disseminação

Da mesma forma que foram encontrados trabalhos com foco no método ou algoritmo de planejamento de rota, também foram encontrados trabalhos em que, apesar de considerar planejamento de rota como estudo de caso, propõem e analisam métodos de disseminação de informações através dos nós do sistema. Em (XU et al., 2015), os autores implementaram um método de planejamento de rotas baseado no estado atual das vias, além disso, avaliaram técnicas de disseminação dessas informações através da rede VANET. Foram usadas como métricas o tempo de viagem dos veículos, a taxa de recebimento de dados pelos nós da rede, e o atraso da rede. Os experimentos foram realizados utilizando as ferramentas SUMO, OMNET++ e Veins.

Em (VALIBAK et al., 2014), os autores apresentam uma estrutura para determinar o menor caminho para um veículo e implementar um método eficiente de disseminação de pacotes. As rotas dos veículos são selecionados com base na probabilidade de sucesso do roteamento de pacotes na rede VANET gerada naquela opção de rota. Já em (COHEN et al., 2014), apesar do trabalho propor um algoritmo de planejamento de rota de veículos se comunicando através de VANETs baseado no A\*, o foco do estudo foi a modelagem de troca de informações entre os veículos. O trabalho (GUO et al., 2018) propôs um método de compartilhamento de informações sobre o trânsito em tempo real através de redes VANETs. Considerando as informações compartilhadas através do método proposto, foi desenvolvida uma forma de estimar o tempo de viagem de um veículo, essa estimativa foi chamada de TTE (*Travel Time Estimation*) e foi utilizada como métrica para o desenvolvimento de um algoritmo de planejamento de rotas

chamado *Real-time TTE Path Planning*.

## 3.4 Arquitetura

### 3.4.1 Centralizada

Foram encontrados trabalhos que propuseram soluções com arquitetura centralizada, é o caso do trabalho (YANG et al., 2016) mencionado na Seção 3.1. Outros trabalhos trataram do planejamento de rotas considerando o processamento das rotas acontecendo em infraestrutura de nuvem computacional. Em (NAJADA; MAHGOUB, 2016), os autores implementaram um *framework* de planejamento de rotas baseado em nuvem computacional. O método de planejamento seleciona uma rota baseado em preferencias do usuário e classificação de *Big Data*. No trabalho de (SHEN et al., 2018) foi utilizado o simulador SUMO para validar um serviço interativo de navegação para reduzir o tempo de atendimento emergencial, a aplicação baseada em nuvem reserva trechos de vias para definir a rota dos veículos emergenciais. Já em (KWAK et al., 2016), foi realizada uma prova de conceito utilizando veículos reais, para tal foi desenvolvido um método de planejamento de rotas baseado em nuvem que realiza o planejamento tomando como parâmetro a situação do trânsito informada por câmeras de vídeo acopladas aos veículos. Em (REGRAGUI; MOUSSA, 2018), os autores desenvolveram uma estratégia de planejamento de rotas em tempo real que utiliza informações do trânsito em tempo real obtidas através de redes VANETs. Um veículo requisita uma nova rota e o servidor envia um pacote de resposta com a rota estabelecida.

### 3.4.2 Descentralizada

Outros trabalhos obtidos como resultados do MSL também apresentaram soluções com foco em arquitetura descentralizada. Por exemplo, em (HE; SHAN; HUANG, 2015), os autores propuseram uma arquitetura descentralizada baseada em *Road Side Units* (RSU), onde o planejamento de rota dos veículos é separado por áreas e em dois níveis. O primeiro nível é o planejamento interárea, onde o RSU responsável pela área calcula a rota do veículo na região que lhe compete. Já o segundo nível é o intra-área, responsável pelo planejamento da rota de transição de uma área para outra até que o veículo passe a ser atendido por outro RSU. Os autores consideraram o tempo de viagem como métrica de qualidade das rotas. No trabalho (LI; HE; DU, 2016), foi proposto um *framework* para evitar congestionamentos planejando rotas utilizando diagrama de Voronoi para dividir o mapa da cidade em regiões e modelar a comunicação entre os veículos. Informações sobre granularidade das regiões são trocadas para evitar congestionamentos.

Em (WEGENER et al., 2006), os autores desenvolveram um sistema descentralizado de monitoramento e gerenciamento de tráfego baseado em VANETs. Os veículos coletam informações, extraem dados relevantes e geram relatórios de tráfego. No estudo (ZHANG

et al., 2018), os autores argumentam que a maioria dos sistemas de otimização de tráfego propostos sofrem com três principais problemas: escalabilidade, imprevisibilidade e dependência de infraestrutura.

A escalabilidade é apresentada como um problema porque os sistemas são propostos com um servidor central, demandando muita comunicação e processamento; imprevisibilidade, pois a maioria utiliza *smartphones* e outros sensores para detectar vias congestionadas, são usados para tratar o problema e não para evitar; e dependência de infraestrutura, pois supõe a existência pré-instaladas de torres de RSU ou redes celulares. Motivados por esses problemas, os autores propõem um sistema de otimização de tráfego totalmente distribuído e sem infraestrutura utilizando redes VANETs.

# 4

## Planejamento de Rotas

Nesse Capítulo são apresentados os algoritmos e a arquitetura desenvolvida para o planejamento de rotas veiculares usando redes VANETs. Além disso, as ferramentas de simulação selecionadas para a validação dos algoritmos são apresentadas e as modificações necessárias nas mesmas são explicadas.

### 4.1 Arquitetura Desenvolvida

A arquitetura desenvolvida tem como objetivo possibilitar a validação experimental do uso de algoritmos e estratégias de roteamento de veículos para melhoria do fluxo de trânsito. A Figura 13 apresenta uma visão simplificada da arquitetura. A arquitetura é composta por três módulos: o módulo de roteamento, o módulo de comunicação e o módulo de mobilidade. O módulo de comunicação é responsável por simular a comunicação das soluções avaliadas em termos de tecnologias de rede; ao módulo de mobilidade cabe a responsabilidade de simular todos os eventos diretamente relacionados ao trânsito, rede viária, movimentação de veículos; Já o módulo de roteamento realiza todos os cálculos necessários para tomada de decisão de mudança de rotas. Os três módulos precisam se comunicar para possibilitar a avaliação de soluções de melhoria de tráfego.

Já a Figura 14 apresenta a implementação da arquitetura fazendo uso de ferramentas de simulação específicas: O SUMO, Veins e OMNET++. Para desenvolver e testar algoritmos de planejamento de rotas foi necessário realizar a modelagem de uma abstração de ruas e suas adjacências, a fim de realizar a computação dos trajetos dos veículos. Como o SUMO não dispunha de interface para obtenção do grafo que representava a rede viária, foi necessário realizar algumas alterações no código fonte do simulador SUMO.

Esse modelo de rede viária é construído no início da execução do processo de monitoramento do trânsito e disponibilizado para o módulo de roteamento, esse processo de construção

Figura 13 – Arquitetura do Sistema

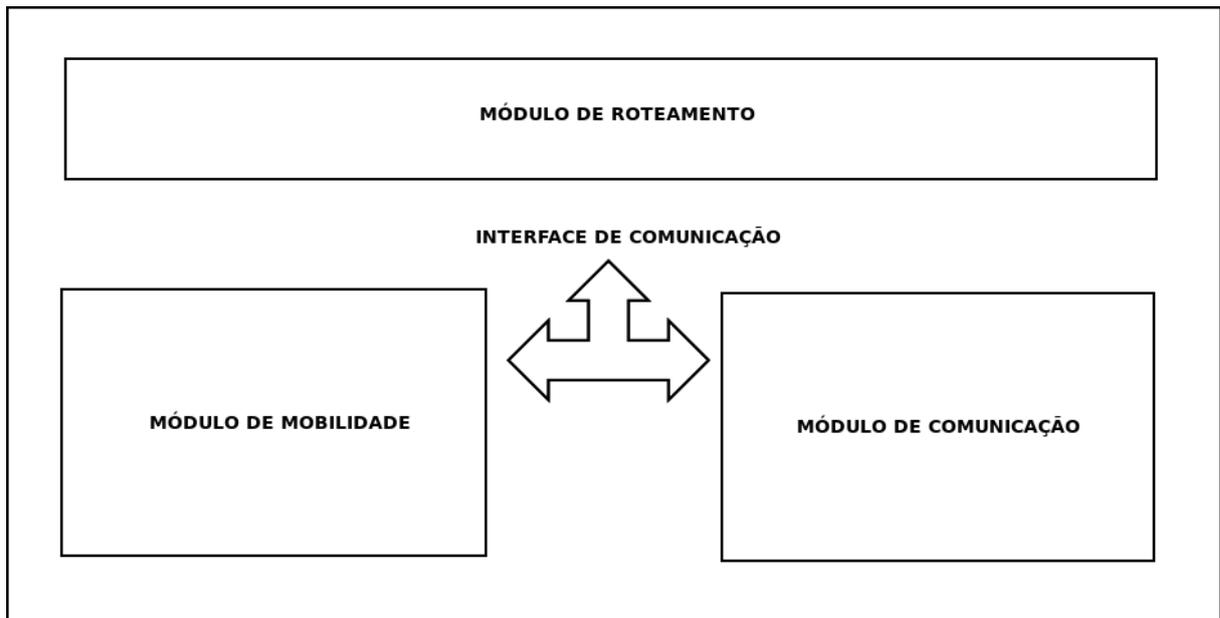
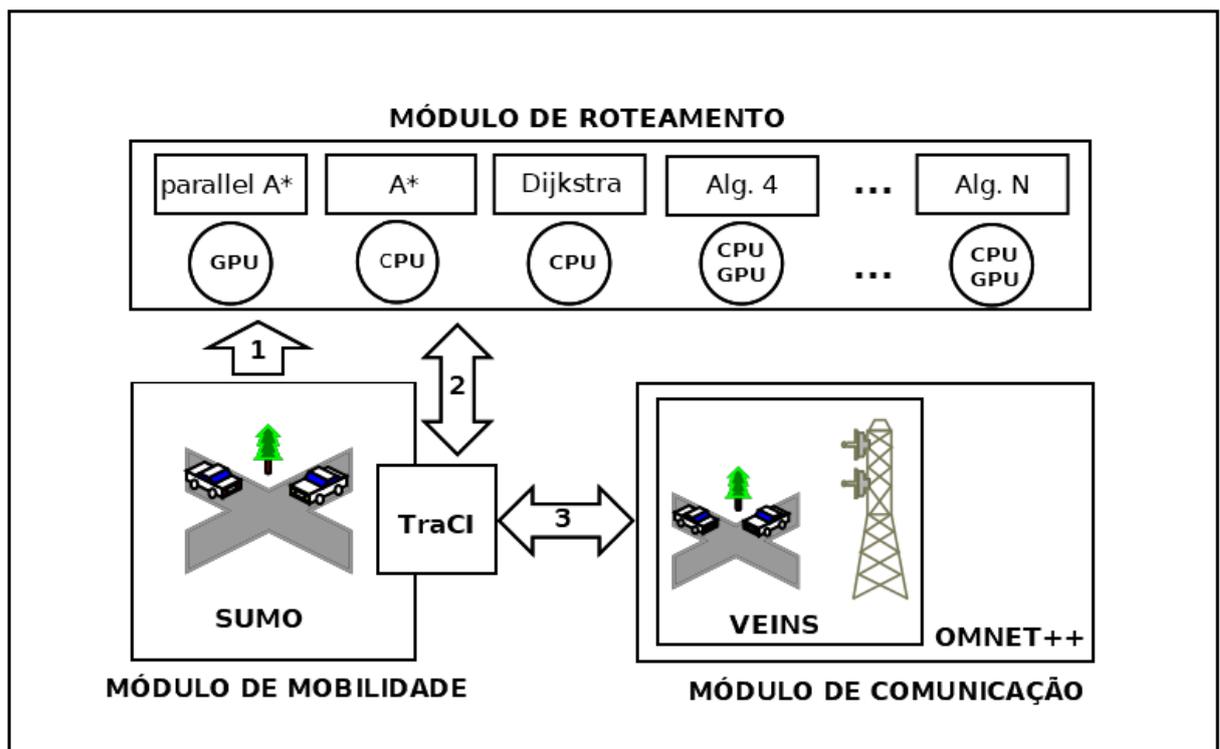


Figura 14 – Arquitetura Implementada do Sistema



de um modelo da rede pode ser visto na Figura 14, representado pela interface de comunicação 1. De posse do modelo de rede viária, o módulo de roteamento desenvolvido se comunica com o módulo de mobilidade, nesse caso, o simulador SUMO, através da sua interface TraCI. Essa comunicação é representada pela interface de comunicação 2 e é realizada nos dois sentidos. Desse modo, o módulo de roteamento consegue obter informações dinâmicas do módulo de

mobilidade, realizar o cálculo de novas rotas para os veículos e informar, ou redefinir, as rotas dos veículos.

Na Figura 14, é possível notar a interface de comunicação 3, que possibilita a comunicação entre os módulos de comunicação e de mobilidade. Esses módulos também se comunicam através da API do TraCI no caso da validação por simulação. O módulo de comunicação foi simulado utilizando as ferramentas OMNET++ e Veins. Dessa forma, eventos no módulo de mobilidade, eventos de trânsito, podem disparar eventos de comunicação de rede, que, através da aplicação, pode requerer o recálculo de rotas para os veículos.

Essa abordagem trouxe a genericidade necessária para que qualquer algoritmo de planejamento de rotas pudesse ser desenvolvido e acoplado ao módulo de roteamento, possibilitando a análise de seu desempenho e impactos no sistema. Outra característica importante do módulo de roteamento é que, é possível avaliar tanto algoritmos executados sobre CPU quanto algoritmos paralelizados para execução sobre GPUs. A modularização da arquitetura possibilita a modificação dos módulos sem grandes impactos ou necessidade de modificação nos restantes.

## 4.2 Paralelismo usando GPU

Em geral, GPUs são chamadas de co-processadores ou aceleradores. São dispositivos externos à CPU. Tais componentes possuem milhares de núcleos operando em frequência na ordem de MHz e contam com uma hierarquia de memórias cuja velocidade varia inversamente proporcional à proximidade em relação aos núcleos. A utilização de processamento paralelo em GPU apresenta melhores resultados em circunstâncias onde a quantidade de cálculos de ponto flutuante é consideravelmente grande e os algoritmos podem ser subdivididos em sub-tarefas independentes. Isso se dá, sobretudo, porque esta arquitetura foi originalmente projetada para o processamento de imagens, que possui tais características, considerando que cada pixel de uma imagem é independente do outro.

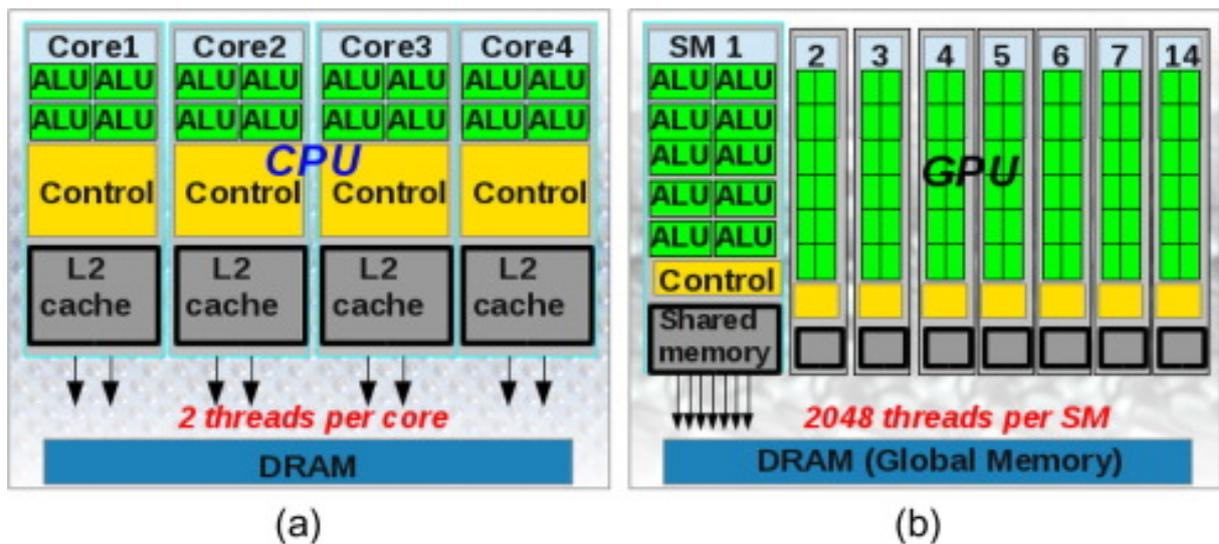
Dessa forma, é plausível considerar a utilização de computação paralela com o objetivo de diminuir o tempo de processamento. (ZHOU; ZENG, 2015), (ZHOU et al., 2018), (ÇINAR; KIRAN, 2016), reportaram ganhos em termos de desempenho computacional quando comparadas implementações seriais e paralelas de um mesmo problema. Em todos os casos apresentados, o desempenho das implementações paralelas obtiveram melhores resultados que as implementações seriais. De maneira geral, à medida em que a quantidade de dados cresce e são necessárias mais operações com ponto flutuante, o desempenho dos algoritmos paralelos cresce.

Esse ganho em termos de desempenho computacional e interesse em paralelização de códigos teve um grande avanço com a utilização de placas gráficas para realizar cálculo de propósito geral, abordagem conhecida como *General Purpose computing on Graphical Processing Units* - GPGPU. Isso foi viabilizado, em grande parte, devido ao surgimento de *Application Programming Interfaces* - APIs que ampliaram o acesso à programação para GPUs.

No mercado de GPUs destaca-se a fabricante Nvidia em virtude do desenvolvimento da API chamada CUDA, direcionada à programação paralela através de seus dispositivos.

Na Figura 15, é possível observar a diferença entre uma CPU Intel Quad Core e uma GPU NVIDIA Kepler, enquanto um core de CPU Intel possui 2 *threads*, um *Streaming Multiprocessor*-SM de GPU de arquitetura Kepler pode ter até 2048 *threads*, e uma GPU pode possuir até 14 SMs, alcançando uma quantidade de *threads* maior.

Figura 15 – (a) Quad core Intel CPU e (b) NVIDIA Kepler GPU.



Fonte: (GOVENDER; WILKE; KOK, 2015)

### 4.3 Algoritmo *parallel A\**

Considerando o levantamento realizado através do mapeamento sistemático e os trabalhos apresentados na Seção 3.2, é possível perceber que existem diversos algoritmos de roteamento. Um dos algoritmos que se destaca é o A-star, ou A\*, que geralmente é modificado para lidar com especificidades do problema onde é aplicado.

Na literatura, o algoritmo A\* é recomendado para lidar com o planejamento de soluções de rotas, por se tratar de um algoritmo heurístico eficiente utilizado para encontrar um caminho de baixo custo (QIAN et al., 2018). O A\* faz uso de uma função de avaliação denotada por  $F(n)$  para guiar e determinar a ordem na qual a busca visita os nós de um grafo representativo do cenário avaliado. A função é dada por:

$$F(n) = g(n) + h(n) \quad (4.1)$$

O critério de visitação dos nós é o menor valor do custo  $F(n)$  (Equação 4.1), custo que é composto pela soma de um custo  $g(n)$  com um custo heurístico  $h(n)$ . Esses custos são inerentes ao problema e abordagem adotados, nesse caso o custo está relacionado ao tempo de viagem. Ao

final da execução do algoritmo A\* o resultado deve ser o caminho que minimiza o valor F(n). Contudo, o caminho obtido pode ser sub-ótimo de acordo com a qualidade da função heurística h(n), escolhida para o problema. Para problemas de roteamento uma função heurística admissível é, por exemplo, a distância euclidiana (Equação 4.2).

$$\sqrt{(x1 - x2)^2 + (y1 - y2)^2} \quad (4.2)$$

Tabela 8 – Pseudocódigo do algoritmo A\*

---

<b>Entrada:</b>	<b>vH:</b> Matriz contendo os pares ordenados XY para cada ponto do grafo, as linhas representa o vértice do grafo e a coluna 1 para x e 2 para y.
	<b>G:</b> Matriz vizinhança que contem custo para sair de um vértice i e chegar a um vértice j.
	<b>Calcular:</b> É uma função que recebe os pontos X e Y e realiza a operação vetorial de cálculo de distância

---

```

1:  PARA (k = 1 : N° carros)
2:      inicio = IniFim[k][0]
3:      fim = IniFim[k][1]
4:      pc[inicio][k]=1
5:      ponto=inicio
6:      ENQUANTO (ponto != fim)
7:          PARA (i = 1 : N° Vértices)
8:              SE ( G[ponto][i] != 0.0 e pc[i][k] != 1)
9:                  Calcular (x , y)
10:                 SE ( CG[i][k] > (G[ponto][i]+CG[ponto][k]) ou vcusto[i][k]=0.0)
11:                     CH[i][k] = sqrt(x*x+y*y)
12:                     CG[i][k] = G[ponto][i]+CG[ponto][k]
13:                     vcusto[i][k]=CG[i][k] + CH[i][k]
14:                     P[i][k]=ponto
15:                 FIM – SE
16:             FIM – SE
17:         FIM – PARA
18:     PARA (i = 1 : N° Vértices)
19:         SE ( pc[i][k] != 1 , vcusto[i][k] e vcusto[i][k]!=0.0)
20:             menor = vcusto[i][k];
21:             imenor = i;
22:         FIM – SE
23:     FIM – PARA
24:     ponto = imenor
25:     pc[ponto][k]=1;
26: FIM – ENQUANTO
27: FIM – PARA

```

---

Como solução para o problema atacado nesse trabalho, o algoritmo A\* foi aplicado a cada veículo do sistema de tráfego de uma cidade inteligente. O pseudocódigo do algoritmo A\* clássico utilizado é apresentado na Tabela 9. Essa aplicação gera uma alta demanda por

poder computacional, devido à grande quantidade de cálculos que precisam ser executados para que cada um dos veículos tenha sua rota planejada. Para tornar essa solução praticável, é necessário dispor de grande infraestrutura computacional, como *clusters* e supercomputadores, além de utilizar técnicas de paralelização de código. Aplicações que demandam alto poder de processamento integram um campo de pesquisa mais amplo, denominado *High Performance Computing* - HPC. Como o próprio nome sugere, em HPC há um interesse especial por arquiteturas, métodos e técnicas para que potencializem a velocidade de processamento dos dados. Entre os dispositivos empregados em HPC, pode-se citar *Graphical Processing Units* - GPUs, FPGAs e CPUs *multicore*. Enquadram-se nesse campo de pesquisa também supercomputadores utilizados para fins acadêmicos, industriais, governamentais, infraestruturas de *Cloud Computing*, dentre outros.

### 4.3.1 Algoritmo Paralelizado

Nesse trabalho, o algoritmo A\* foi implementado de forma paralela para ser executado em GPUs. O algoritmo foi desenvolvido de maneira a se tornar capaz de calcular as rotas de, não apenas um veículo, mas de vários veículos simultaneamente. Essa mudança foi realizada a partir do ponto de vista da existência de uma entidade central responsável por fazer o planejamento das rotas de todos os veículos da área simulada. Portanto, todos os veículos deveriam comunicar suas rotas à entidade centralizada.

O algoritmo apresentado na Tabela 9 tem como dados de entrada: uma matriz de vizinhança e uma matriz que armazena os pares XY. A matriz que contém os pares XY possui um número de linhas igual a quantidade de vértices da área simulada, isto é, a quantidade de cruzamentos entre vias do mapa simulado. Além disso, essa matriz possui duas colunas, uma para o ponto cartesiano X e outra para o Y. Essa matriz permite o cálculo da heurística a partir da distância euclidiana entre vértices.

A matriz de vizinhança, por sua vez, é caracterizada por uma matriz quadrada ( $N \times N$ ) com dimensão 'N' igual ao número de vértices do grafo. Cada posição (i, j) contém um valor relacionado ao custo para sair do vértice i e chegar ao vértice j, desde que sejam vizinhos entre si. Caso os vértices não sejam vizinhos, atribui-se o valor zero, que significa a impossibilidade de sair do vértice i e alcançar o vértice j diretamente.

Considerando que a matriz de pares XY não se altera durante a simulação e que a matriz de vizinhança, com seus custos associados, representa o estado das vias da rede viária em um instante T, todos os veículos podem ter suas rotas calculadas no instante T tomando as matrizes como referência. Essa abordagem possibilita o cálculo das rotas como operações independentes (cada veículo) sobre um mesmo conjunto de dados (situação da rede viária).

Tabela 9 – Pseudocódigo do algoritmo Parallel A\*

---

<b>Entrada:</b>	<p><b>H:</b> Matriz contendo os pares ordenados XY para cada ponto do grafo, as linhas representa o vértice do grafo e a coluna 1 para x e 2 para y.</p> <p><b>G:</b> Matriz vizinhança que contem custo para sair de um vértice i e chegar a um vértice j.</p> <p><b>Calcular:</b> É uma função que recebe os pontos X e Y e realiza a operação vetorial de cálculo de distância</p>
-----------------	---

---

```

1: k = blockIdx.x
2: inicio = IniFim[0+k*2]
3: fim = IniFim[1+k*2]
4: pc[k+inicio*(Nº carros)]=1
5: ponto=inicio
6: ENQUANTO (ponto != fim)
7:   PARA (i = 1 : N° Vértices)
8:     SE ( G[i+ponto*(N° vértices)] != 0.0 e pc[k+i*(Nº carros)] != 1)
9:       Calcular (x , y)
10:      SE (CG[k+i*(Nº carros)] > (G[i+ponto*(N° vértices)]+CG[k+ponto*(Nº carros)]))
11:        CH[k+i*(Nº carros)] = sqrt(x*x+y*y)
12:        CG[i+k*(Nº carros)] = G[k+i*(Nº carros)]+CG[k+ponto*(Nºcarros)]
13:        vcusto[k+i*(Nº carros)]=CG[k+i*(Nº carros)] + CH[k+i(Nº Carros)]
14:        P[k+i*(Nº carros)]=ponto
15:      FIM – SE
16:    FIM – SE
17:  FIM – PARA
18:  PARA (i = 1 : N° Vértices)
19:    SE ( pc[k+i*(Nº carros)] != 1 , vcusto[k+i*(Nº carros)] e vcusto[k+i*(Nºcarros)]!=0.0)
20:      menor = vcusto[k+i*(Nº carros)];
21:      imenor = i;
22:    FIM – SE
23:  FIM – PARA
24:  ponto = imenor
25:  pc[k+ponto*(Nº carros)]=1;
26: FIM – ENQUANTO

```

---

## 4.4 Ferramentas de Simulação

Considerando a inviabilidade de realizar experimentos em cenários reais, dadas as características do problema, neste trabalho foi feita a opção de trabalhar com simulação, haja vista que em simulações as variáveis do sistema apresentam um comportamento semelhante ao ambiente real, acarretando uma sucessão de eventos cronológicos. As ferramentas utilizadas foram o SUMO, o OMNET++ e o *framework* Veins, que são detalhadas a seguir.

### 4.4.1 SUMO - *Simulation of Urban MOBility*

A ferramenta SUMO, do inglês *Simulation of Urban MOBility*, é um simulador de tráfego e mobilidade microscópico desenvolvido para trabalhar com grandes redes viárias e

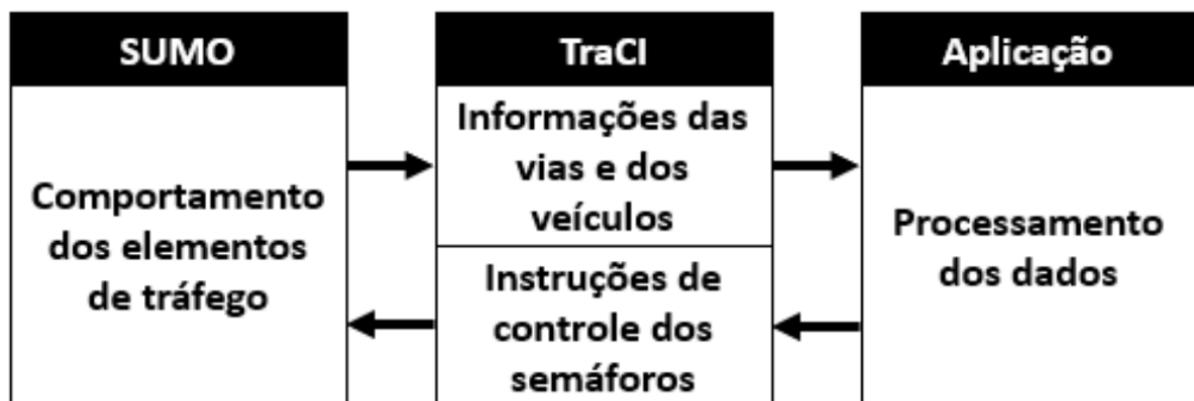
com grandes quantidades de veículos. O SUMO foi desenvolvido por pesquisadores do *Institute of Transportation Systems at the German Aerospace Center* e disponibilizado sob licença *opensource*, ou seja, o seu código é aberto para que outros pesquisadores façam alterações. (KRAJZEWICZ et al., 2012)

Entre outras coisas, o simulador SUMO foi escolhido por prover algumas ferramentas para modelagem das redes viárias, modelos matemáticos para medição de emissão de poluentes e *scripts* para automação de processos. Além disso, uma das principais características desse simulador é sua facilidade em construir API que interajam com o mesmo. O SUMO possui uma interface de comunicação chamada TraCI - *Traffic Control Interface* através da qual é possível interagir com a simulação em tempo de execução.

#### 4.4.1.1 TraCI - *Traffic Control Interface*

A partir do TraCI é possível obter os dados de tráfego e alterar o comportamento dos elementos presentes na simulação em tempo real. A interface TraCI utiliza uma arquitetura cliente/servidor baseada no protocolo TCP, na qual o SUMO atua como um servidor, e uma outra aplicação, desenvolvida com o objetivo de controlar ou consumir dados da simulação, atua como cliente. Desta forma, a aplicação envia comandos para o SUMO a fim de controlar elementos presentes na simulação ou requisitar informações sobre ela. O SUMO, por sua vez, retorna as informações solicitadas ao TraCI. A Figura 16 ilustra o modelo.

Figura 16 – Modelo Cliente/Servidor do TraCI



#### 4.4.2 OMNET++

O OMNET++ é uma ferramenta para simulação de eventos discretos construído na linguagem C++. Ele foi criado com o intuito de ser um framework de construção de simulações de redes com alto grau de modularidade e extensibilidade, essas características permitem que alterações e integrações com outras bibliotecas e ferramentas sejam realizadas. Desse modo,

é possível utilizar o OMNET++ em conjunto com o SUMO, isso é feito através do uso do framework Veins, que implementa uma comunicação bidirecional entre os dois simuladores.

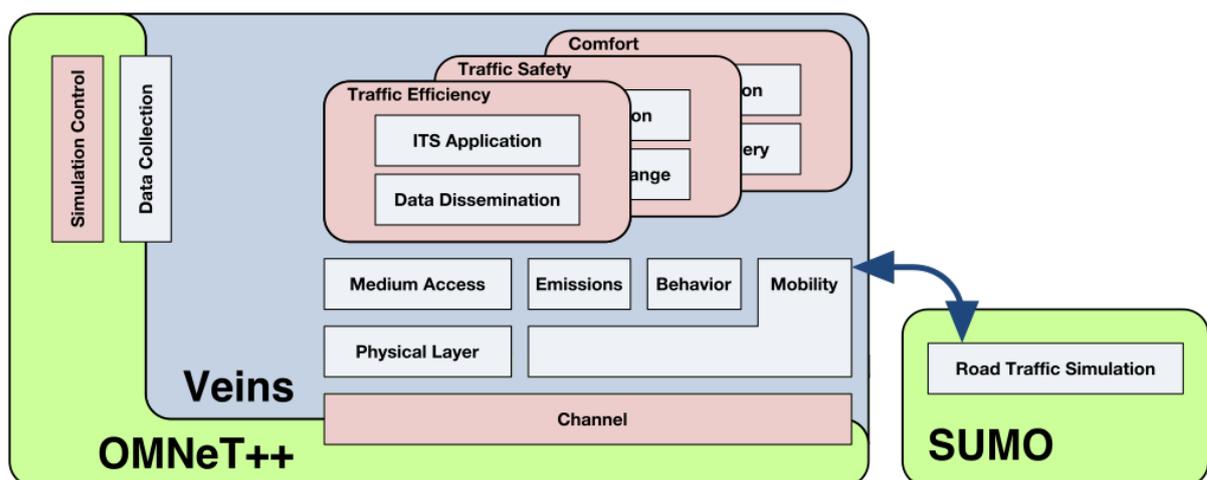
O OMNET++ implementa uma arquitetura de componentes para os módulos a serem simulados. O comportamento destes componentes deve ser programado em C++, e os componentes são integrados em uma linguagem de alto nível chamada NED. O principal objetivo da linguagem NED é descrever as topologias de rede a serem utilizadas e como os módulos criados se relacionam. Além disso, a ferramenta disponibiliza uma interface gráfica, um ambiente de desenvolvimento baseado na IDE Eclipse e vasta documentação.

#### 4.4.3 VEINS - *Vehicles in Network Simulation*

Considerando o OMNET++ como ferramenta para simulação de redes e o SUMO como simulador de trânsito e mobilidade que disponibiliza uma interface de comunicação chamada TraCI, o Veins é um framework para o OMNET++ que implementa modelos e protocolos de redes veiculares e provê uma interface de comunicação bidirecional entre o OMNET++ e o SUMO, através da interface TraCI. A Figura 17 mostra a arquitetura do VEINS.

O Veins implementa um módulo de mobilidade que se liga ao SUMO (Road Traffic Simulation) através da interface de controle de tráfego (TraCI). Essa comunicação faz com que cada evento simulado no SUMO, gere um evento no OMNET++ e vice-versa. A ferramenta em questão possui código aberto, interage com o SUMO em tempo de execução e implementa o padrão IEEE 802.11p, que implementa os protocolos para redes VANETs.

Figura 17 – Arquitetura do VEINS



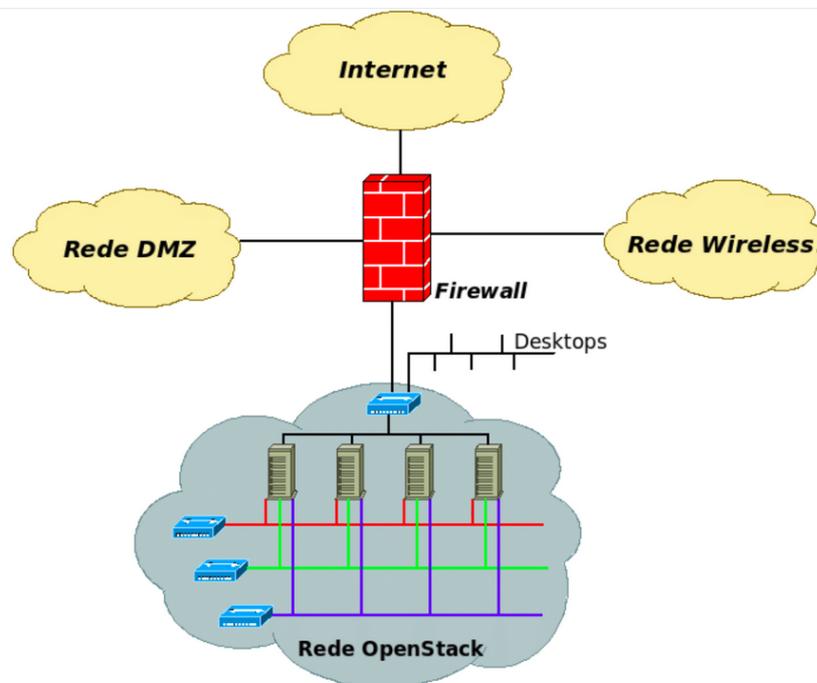
Fonte: (SOMMER, 2019)

## 4.5 Recursos

Os testes e experimentos dessa pesquisa utilizaram recursos de dois laboratórios localizados na Universidade Federal de Sergipe, foram eles: o *Experimental Laboratory in computer*

*Networks* - ELAN, que dispõe de uma infraestrutura de rede experimental além de uma infraestrutura de servidores compondo uma nuvem computacional, mostrado na Figura 18, e o Laboratório de Computação de Alto Desempenho - LCAD (LCAD/UFS, 2017), que dispõe de um *cluster* de computadores com arquitetura paralela composto por 27 nós de processamento com dois processadores Intel Xeon Ten-core E5-2660v2, 64 GB de memória RAM, disco SSD de 160 GB, cada, onde, dos quais, 5 nós de processamento contam com 2 GPUs Nvidia Tesla K20, cada. O *cluster* também possui um nó de *storage* com capacidade de armazenamento de 128TBytes, 128 GB de memória RAM e dois processadores Intel Xeon Six-core E5-2620. Além disso, as simulações prévias de validação foram executadas em um notebook com processador Intel i7-7700HQ, 16 GB de memória RAM, disco SSD de 256 GB e GPU Nvidia GTX 1050ti, rodando o sistema operacional Ubuntu 16.04.

Figura 18 – Diagrama lógico da rede/cloud experimental do ELAN



# 5

## Resultados e Discussão

As simulações foram conduzidas a fim de avaliar os impactos de um Sistema Inteligente de Transporte no planejamento de rotas veiculares no trânsito de uma cidade. Este Capítulo apresenta as configurações de simulação, os resultados obtidos e discussões realizadas acerca dos mesmos.

### 5.1 Estudo de Caso

Para o estudo de caso foi escolhida uma região central da cidade de Aracaju, estado de Sergipe, Brasil. Essa área pode ser observada na Figura 19. A área selecionada foi utilizada na construção de um modelo que pode ser visualizado na Figura 20. A área simulada possui uma largura e comprimento de, aproximadamente, três mil metros e dois mil metros, respectivamente, que pode ser observada através da escala nas imagens. A área total simulada resultante foi de 6 quilômetros quadrados, contendo 952 ruas.

As cargas simuladas de veículos foram crescentes, foram aumentadas com o intuito de produzir estresse na rede viária e sobrecarga nos algoritmos analisados. As cargas utilizadas variaram de um fluxo de entrada de um veículo a cada dois segundos, até o fluxo de entrada de veículos na área simulada de 2.5 veículos a cada segundo. A Figura 21 apresenta as cargas utilizadas em termos absolutos de quantidades de veículos que passaram pela área simulada durante o tempo de simulação.

O fluxo de entrada máximo de veículos foi escolhido em função do tamanho do mapa, pois, a densidade de carros ativos no sistema se torna limitante do ponto de vista espacial. Foi definido que a distância entre o par origem/destino das rotas aleatórias deveria ser de, no mínimo, 2 quilômetros a fim de criar um cenário susceptível a existência de congestionamentos voluntários e involuntários no fluxo de tráfego na região central do mapa.

Todas as simulações foram executadas utilizando os mesmos parâmetros para modelar

Figura 19 – Área Simulada vista no OpenStreet Map

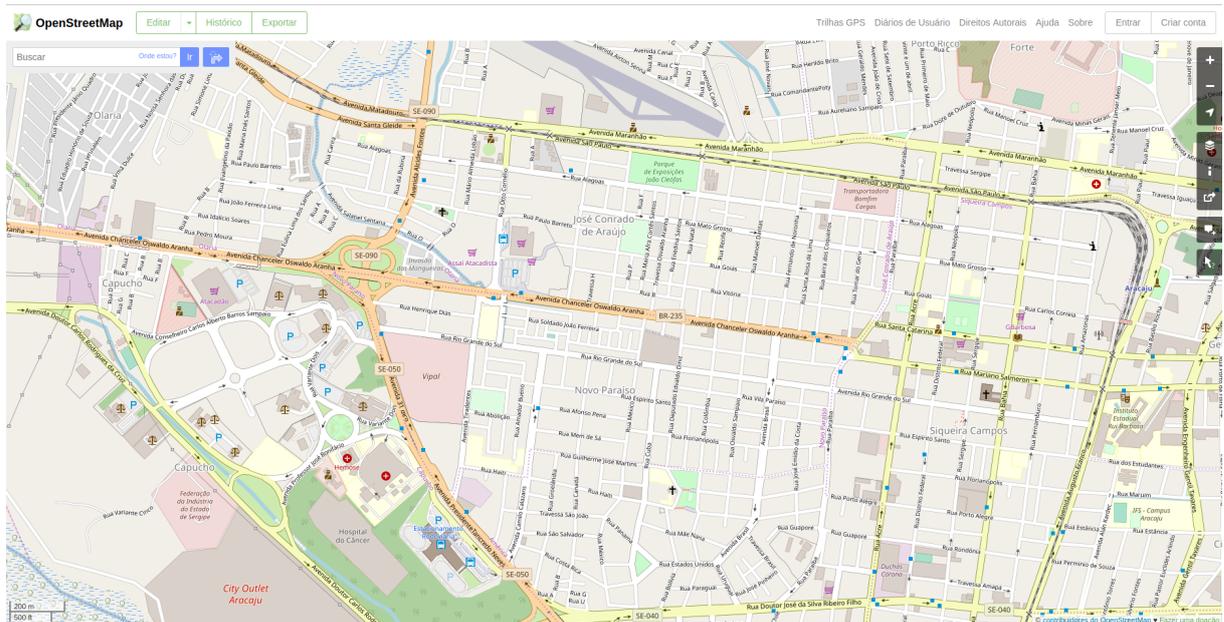
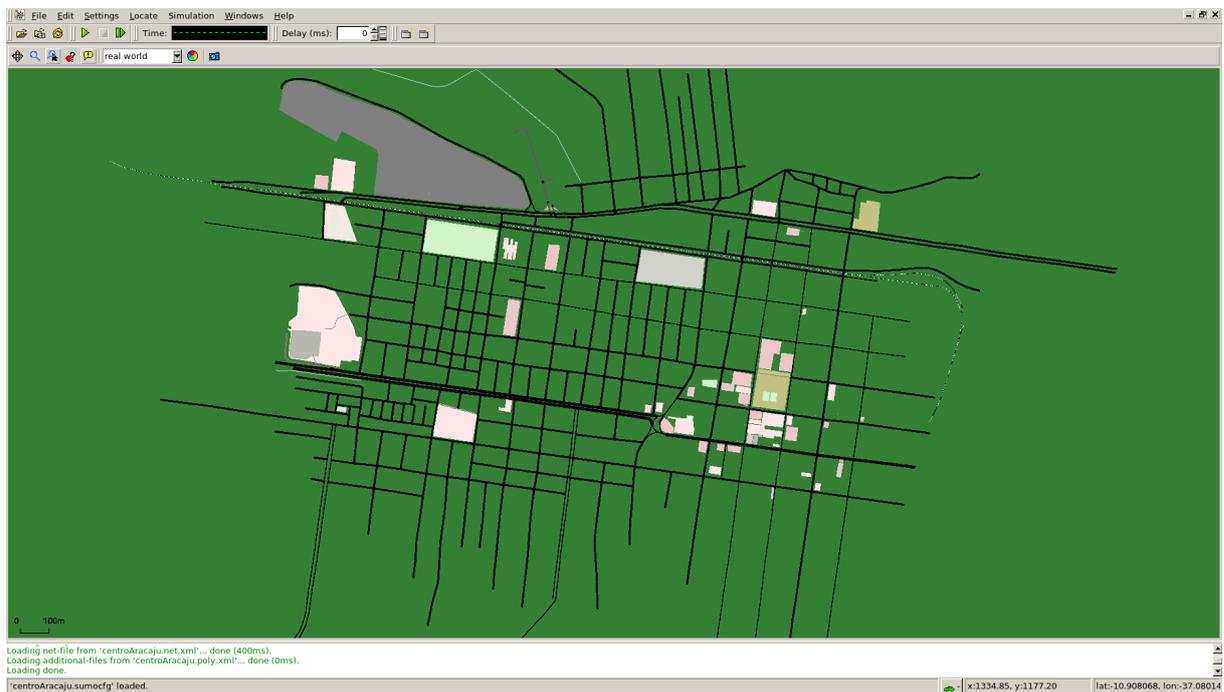


Figura 20 – Área Simulada vista no SUMO



a rede VANET. Os parâmetros de simulação das redes VANETs foram resumidos na Tabela 10. São eles: frequência portadora, distância máxima de interferência, potência de transmissão, vazão da rede, nível mínimo de potência, patamar de ruído e atraso de propagação.

Figura 21 – Número de veículos

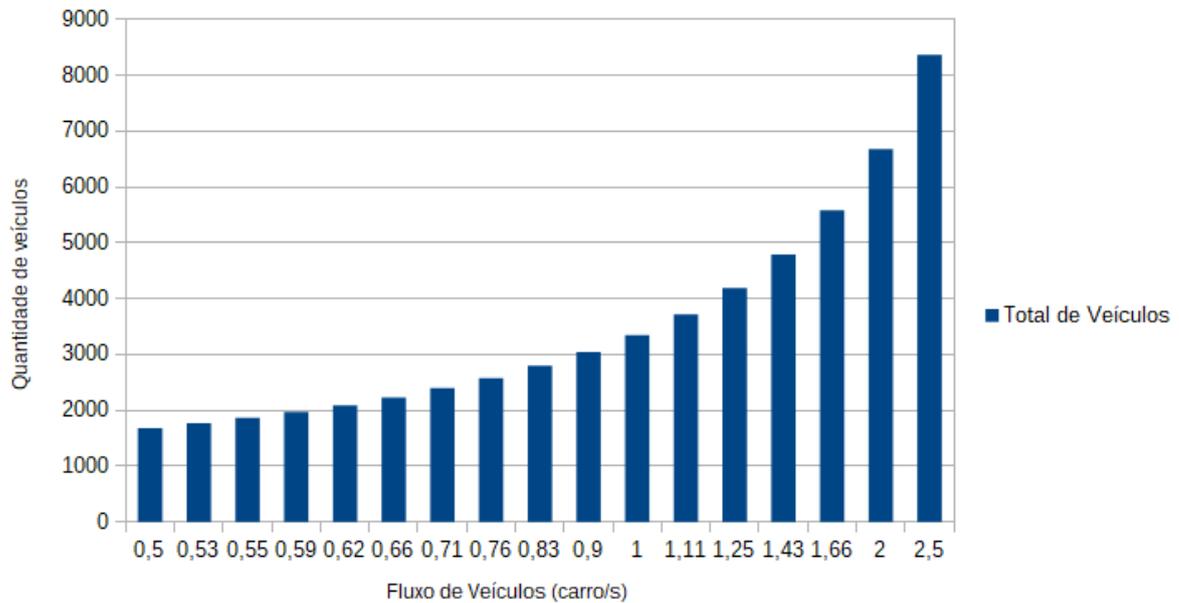


Tabela 10 – Parâmetros de simulação das VANETs

Parâmetro	Valor
.connectionManager.carrierFrequency	5.890e9 Hz
.connectionManager.maxInterfDist	2600m
**.nic.mac16094.txPower	20mW
**.nic.mac16094.bitrate	6Mbps
**.nic.phy80211p.minPowerLevel	-110dBm
**.nic.phy80211p.noiseFloor	-98dBm
**.nic.phy80211p.usePropagationDelay	True

## 5.2 Análise Quantitativa dos Resultados

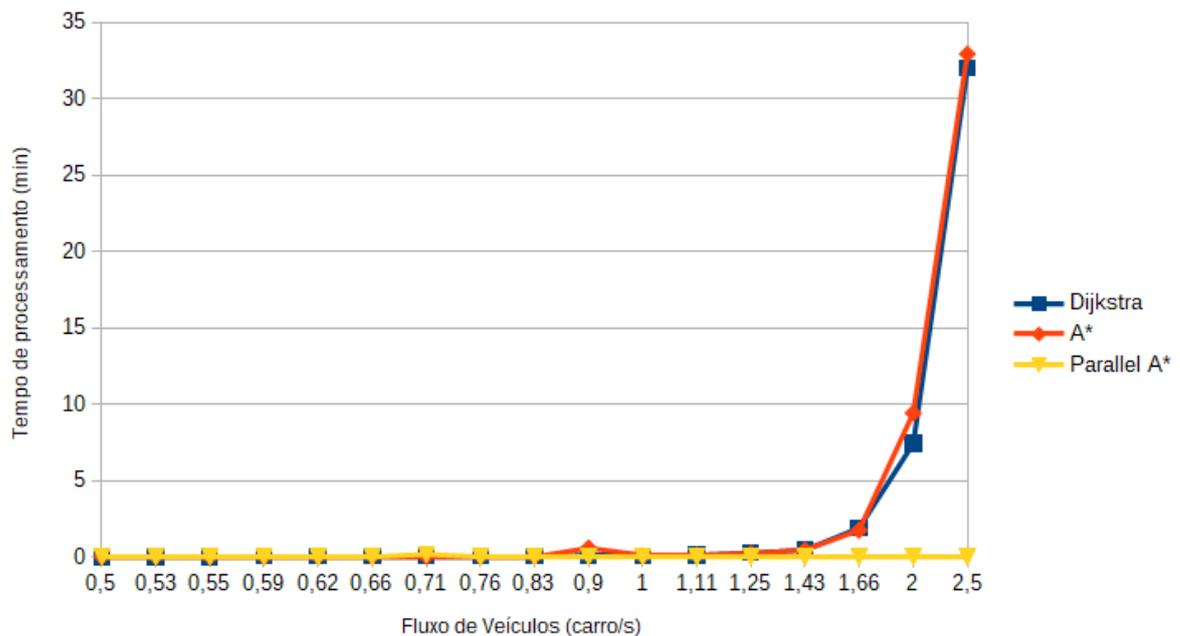
Nesta Seção são apresentados resultados que foram descritos como quantitativos. Foram chamados de quantitativos os resultados que se relacionam ao desempenho das simulações e dos algoritmos executados, mas que não se relacionam às métricas que foram consideradas como medida de qualidade das rotas geradas pelo sistema. As medidas apresentadas como quantitativas são: o tempo de processamento de rotas, a taxa de atualização da simulação, o número de passos de simulação necessários, o fator de tempo real da simulação e o tempo total de simulação.

### 5.2.1 Tempo de Processamento de Rotas

O gráfico apresentado na Figura 22 mostra que não foram constatadas diferenças relevantes no tempo necessário para o reprocessamento de rotas entre os algoritmos Dijkstra e A\*. No entanto, o tempo total necessário para planejamento de rotas utilizando o algoritmo

A\* paralelizado foi muito menor. Considerando o fluxo de veículos máximo de 2,5 carros por segundo, os algoritmos Dijkstra e A\* levaram um total de 31,97 e 32,92 minutos para calcular todas as rotas, respectivamente. Já o algoritmo A\* paralelizado levou cerca de 12 milissegundos para executar a tarefa para o mesmo fluxo de entrada de veículos.

Figura 22 – Tempo de Processamento de Rotas

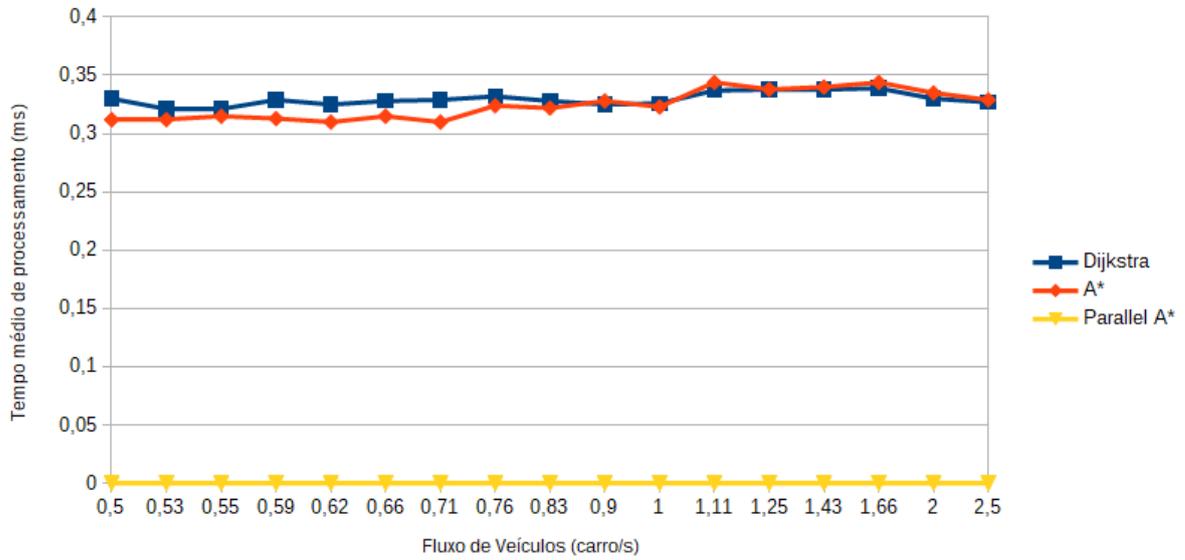


Essa diferença fica mais clara ao observar o gráfico da Figura 23. Essa imagem apresenta o tempo médio de processamento das rotas dos veículos para cada um dos algoritmos analisados. Isto é, o tempo necessário, em média, para processar a rota de cada um dos veículos. Foi verificado que, ao utilizar o algoritmo Dijkstra, o tempo necessário para reprocessamento das rotas é um pouco superior, mas, o A\* também apresenta um crescimento equivalente no tempo de processamento médio à medida em que a taxa de entrada de veículos é aumentada. Já o algoritmo A\* paralelizado, apesar do crescimento da taxa de entrada de veículos, não apresentou crescimento no tempo médio de processamento.

## 5.2.2 Taxa de Atualização da Simulação

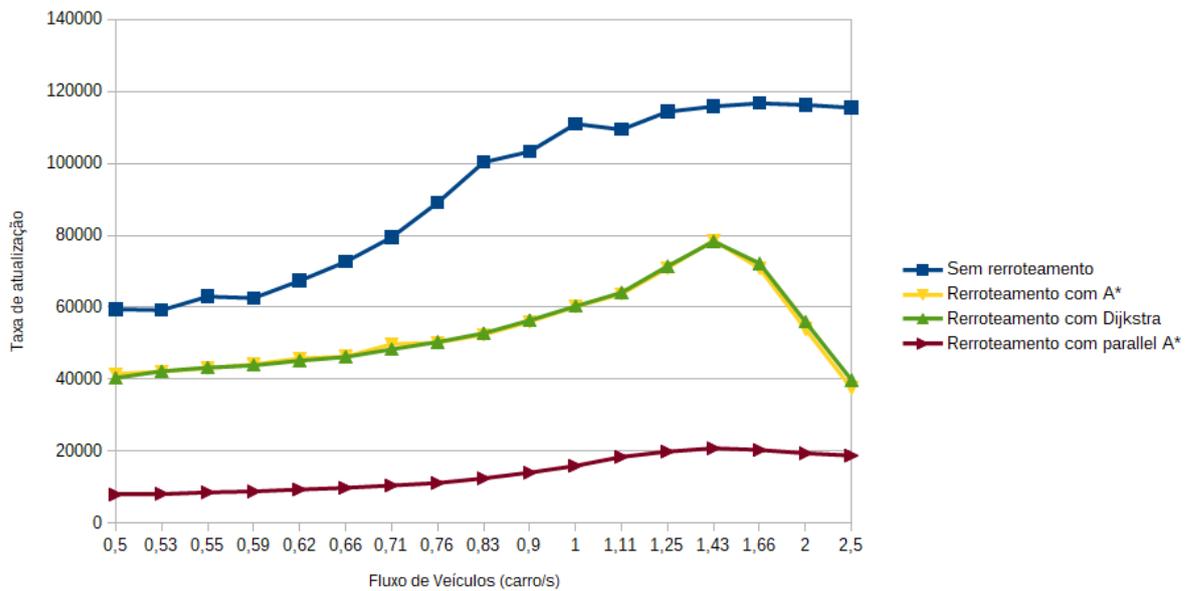
A Figura 24 representa a métrica de Taxa de Atualizações por segundo que o simulador efetuou, ou seja, quantos eventos o simulador está processando por unidade de tempo. É possível notar que, ao utilizar os algoritmos analisados como estratégia de roteamento, ocorre uma queda nessa medida. Essa medida se mantém aproximadamente constante até o fluxo de 1,43 carros por segundo, onde a curva começa a apresentar uma maior diminuição. Para o caso do algoritmo A\* paralelizado, essa taxa de atualização foi muito menor, chegando a no máximo 20000 instruções. Os dados desse resultado ajudam a justificar os tempos maiores necessários

Figura 23 – Tempo Médio de Processamento de Rotas



para executar as simulações com o algoritmo paralelizado apresentados na Figura 26, já que com uma menor taxa de processamento de instruções por segundo é necessário mais tempo para executar as tarefas de simulação.

Figura 24 – Atualizações por segundo

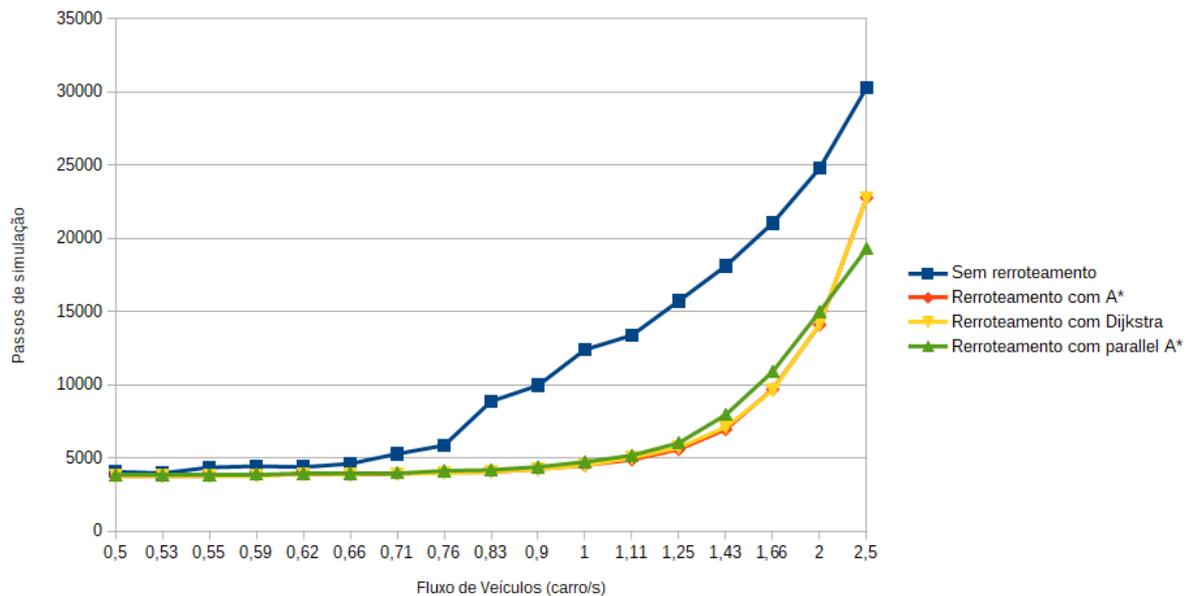


### 5.2.3 Numero de eventos de Simulação

Os resultados de número de eventos de simulação, ou seja, o número de passos que todos os veículos levam para concluir seus trajetos, são apresentados na Figura 25, considerando que a

simulação se encerra quando todos os veículos chegam a seus respectivos destinos. É possível observar que, para todas as cargas, o número de passos de simulação é maior quando não são utilizadas estratégias de re-roteamento. Não foram constatadas diferenças substanciais entre os algoritmos Dijkstra, A\* e A\* paralelizado.

Figura 25 – Número de passos de simulação

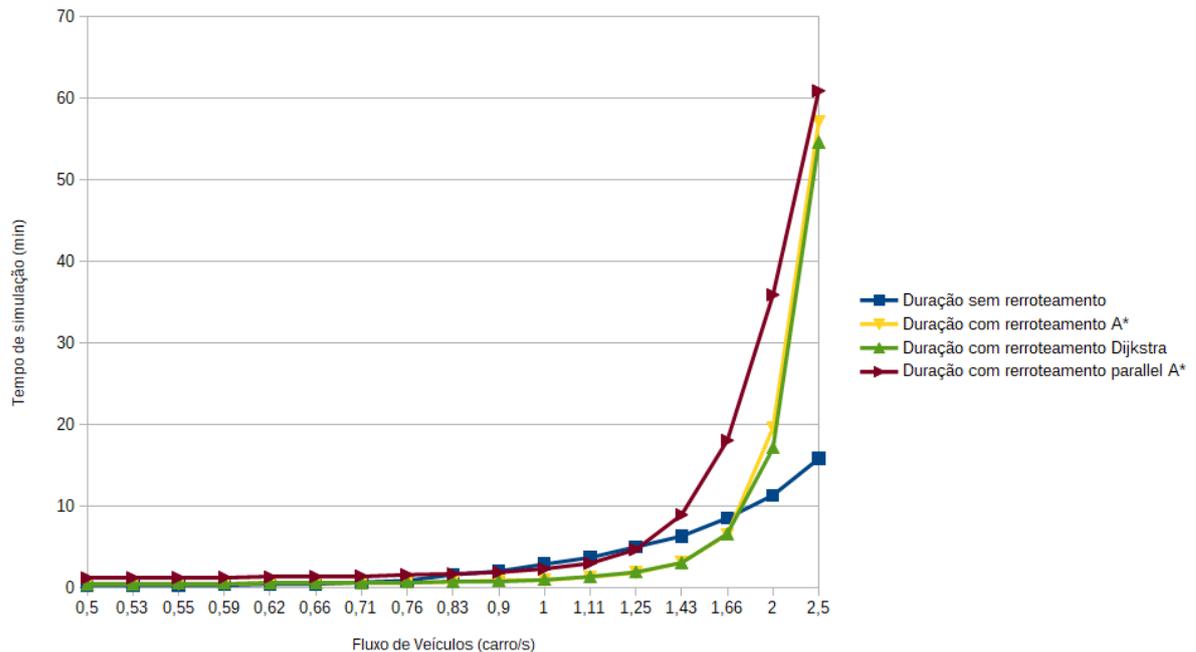


#### 5.2.4 Tempo de Simulação

Na Figura 26, são apresentados resultados obtidos em termos de tempo de simulação. É possível observar que não foram verificadas diferenças relevantes no tempo de simulação quando os algoritmos Dijkstra e A\* seriais foram utilizados. Até o fluxo de entrada de 0,9 carros por segundo não houve diferença relevante nos tempos de simulação entre execuções utilizando algoritmos de planejamento de rotas e execuções onde não foi realizado o planejamento de rotas. Mas, ao aumentar a quantidade de veículos inseridos na rede viária, foi possível observar um comportamento de crescimento exponencial do tempo necessário para realizar os cálculos e simulações quando os algoritmos de planejamento de rotas analisados foram utilizados.

Entre os algoritmos, é possível observar que ao utilizar algoritmo A\* paralelizado no rerroteamento, o resultado apresentou uma maior duração. Esses tempos de simulação obtidos foram maiores, em grande parte, pelo fato do algoritmo paralelo utilizar uma abordagem *out of the box*, sendo um elemento externo à simulação que necessitava reconstruir o contexto em suas estruturas de dados a cada execução.

Figura 26 – Duração total da simulação



## 5.2.5 Análise dos Resultados de Qualidade do Serviço

Nesta Seção são apresentados resultados que foram descritos como medidas de qualidade do serviço. Foram chamados assim os resultados que se relacionam à qualidade das rotas geradas e à redução dos congestionamentos na área simulada. As medidas apresentadas como de qualidade de serviço são: o atraso médio de entrada, tempo médio de espera, o atraso total médio, o comprimento médio das rotas e o tempo médio de viagem.

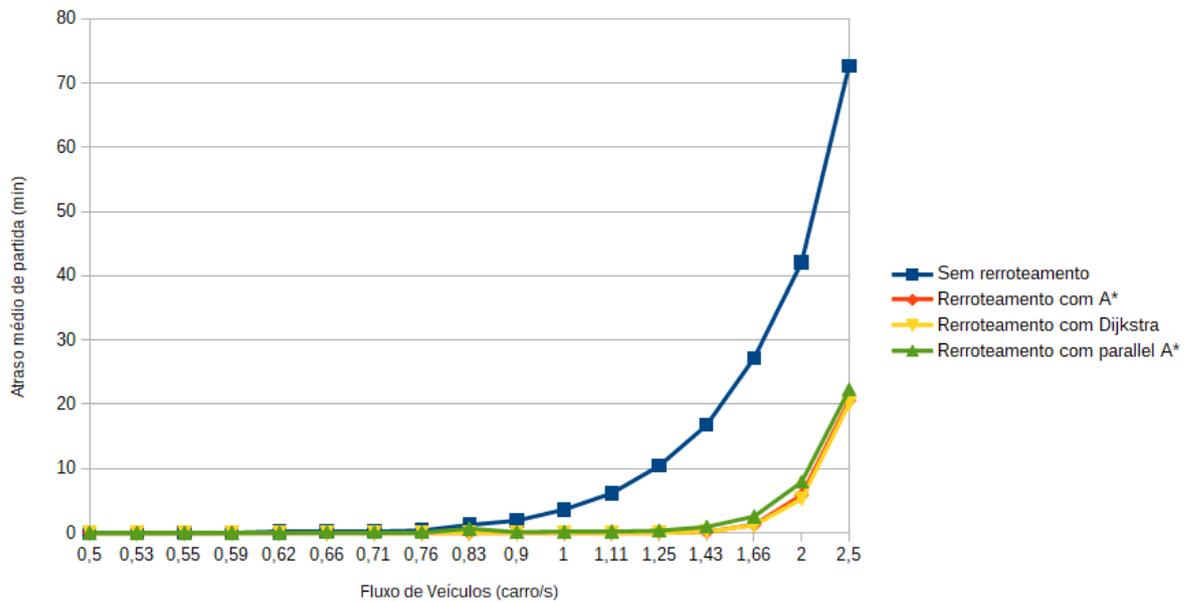
### 5.2.5.1 Atraso Médio de Entrada

Na Figura 27, o gráfico apresenta o resultado do atraso médio de entrada, isto é, por quanto tempo, em média, os veículos esperaram para iniciar seus trajetos por conta do congestionamento e indisponibilidade das vias. Quando a quantidade de veículos simulados no cenário cresce, essa métrica também tende a crescer, no entanto, enquanto nas simulações sem estratégia de roteamento a inclinação da curva de crescimento exponencial começou a aparecer aproximadamente no fluxo de entrada de 0,9 carros por segundo, ao utilizar estratégias de roteamento, com ambos os algoritmos, a inclinação acentuada da curva de crescimento exponencial só se tornou observável em maiores fluxos de entrada, não sendo observadas diferenças relevantes entre os algoritmos seriais e o A\* paralelizado.

### 5.2.5.2 Atraso Médio de Espera

O gráfico da Figura 28 apresenta o atraso médio de espera dos veículos na rede. Isto é, o tempo que os veículos passam parados involuntariamente, por motivos de congestionamentos e

Figura 27 – Atraso médio de partida



lentidões no trânsito. No geral, quando os algoritmos de roteamento foram utilizados, o tempo de espera foi sempre menor em comparação às simulações sem estratégia de roteamento, exceto para o fluxo de entrada máximo, onde os algoritmos seriais apresentaram tempos maiores do que ao não utilizar roteamento.

É possível perceber que a partir da taxa de entrada de 1.11 veículos por segundo, o tempo de espera passa a apresentar uma inclinação mais acentuada na curva que cresce exponencialmente para todos os algoritmos, à medida em que a carga aumenta. Ainda assim, a estratégia de roteamento utilizando o algoritmo A\* paralelizado apresentou os melhores resultados quando a maior carga foi considerada.

### 5.2.5.3 Atraso Total Médio

A média de atraso total pode ser lida como o tempo médio perdido por cada veículo. Esse tempo inclui os tempos médio de espera e atrasos de partidas mencionados anteriormente. O gráfico apresentado na Figura 29 apresenta esse atraso médio total. Assim como nos resultados anteriores, a estratégia de roteamento utilizando o A\* paralelizado apresentou tempos menores quando a carga máxima do sistema foi considerada, mostrando que essa solução se comporta melhor em sistemas mais sobrecarregados.

### 5.2.5.4 Comprimento Médio das Rotas

Na Figura 30 é possível observar o comprimento médio das rotas dos veículos simulados. Quando não foi aplicada estratégia de roteamento o comprimento das rotas não se alterou, pois os veículos não alteraram suas rotas independente das condições das vias, no entanto, ao aplicar

Figura 28 – Tempo médio de espera

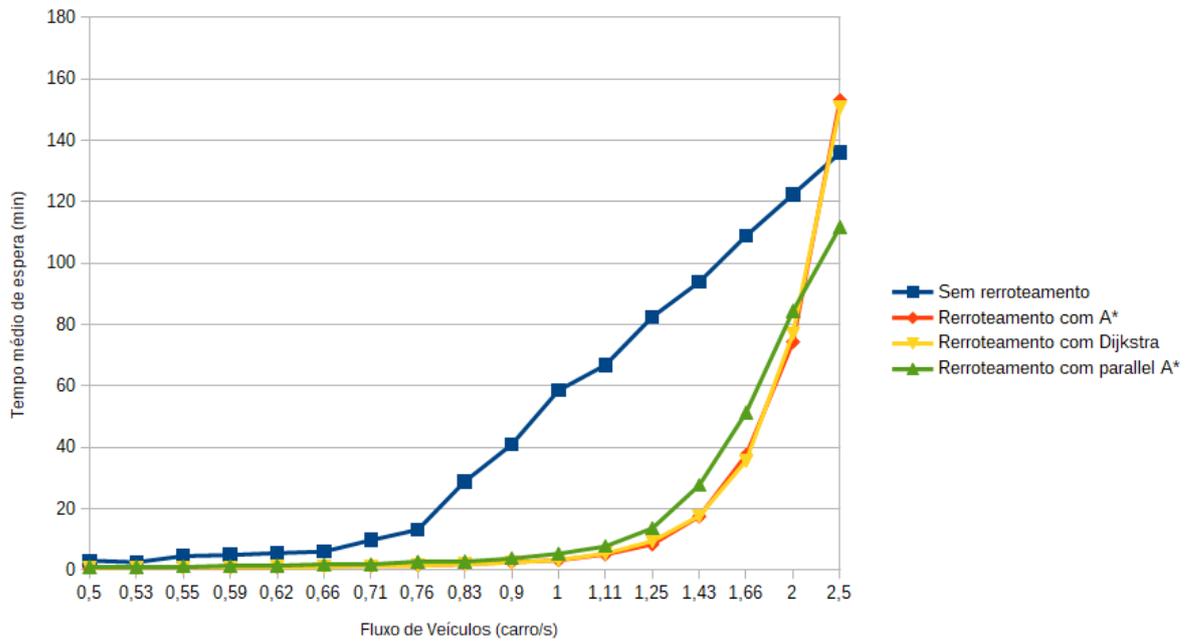
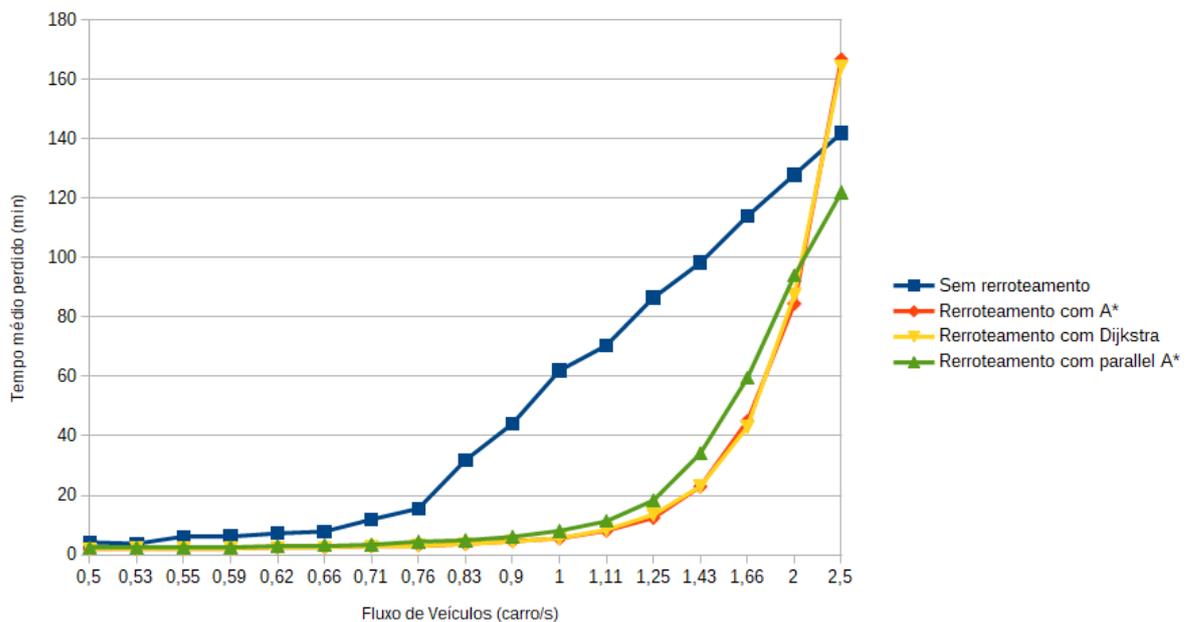


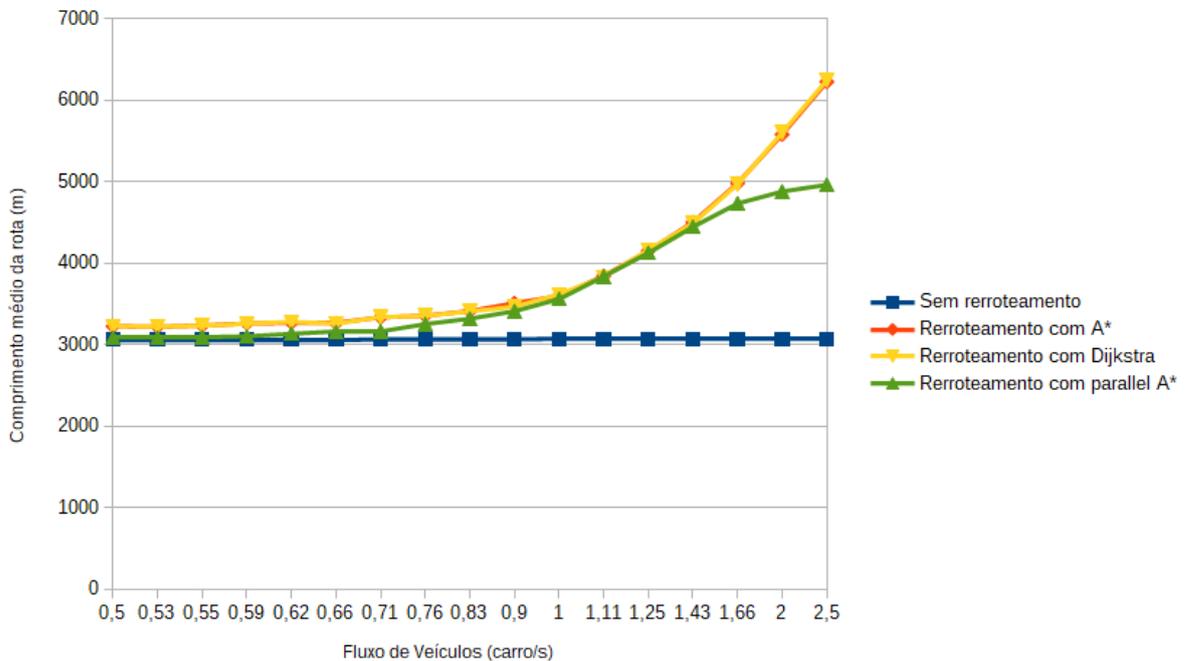
Figura 29 – Atraso total médio



estratégias de roteamento com todos os algoritmos, foi verificado que o comprimento da rota cresce à medida em que a taxa de entrada de veículos é aumentada. Esse comportamento se dá pois, considerando o estado das vias, se torna aceitável optar por caminhos mais longos em troca de um tempo de viagem menor. Os algoritmos de roteamento apresentaram comportamento semelhantes até a carga de 1,43 carros por segundo, quando o algoritmo A\* paralelizado passou

a entregar como resultado rotas com comprimento médio menor.

Figura 30 – Comprimento médio das rotas



### 5.2.5.5 Tempo Médio de Viagem

Já na Figura 31, é possível verificar que, quando os algoritmos de replanejamento de rotas são aplicados, os tempos médio de viagens são menores. Em comparação com a Figura 30, é observável que, apesar do crescimento do comprimento médio das rotas com o aumento do fluxo de entrada de veículos, o tempo médio de viagem sem uso de estratégia de roteamento foi maior em praticamente todas as cargas avaliadas. Esse resultado demonstra um *tradeoff*, os veículos são direcionados por rotas mais longas para evitar passar mais tempo presos no trânsito. Vale ressaltar que os melhores resultados na maior carga considerada foram obtidos pelo algoritmo A\* paralelizado desenvolvido. Nas outras cargas não foram verificadas diferenças relevantes entre os algoritmos analisados.

## 5.3 Resultados VANETs

Nesta Seção são apresentados os resultados obtidos referentes a arquitetura da rede VANET modelada para a aplicação de roteamento de veículos. A Figura 32 mostra a quantidade de mensagens recebidas pelos nós da rede nessa aplicação. É possível observar que à medida em que a carga cresce, a quantidade de mensagens trocadas também cresce. Esse comportamento se explica pelo fato de que o crescimento da carga de veículos implica em uma maior densidade de veículos na área de alcance dos seus pares que notificam travamentos no trânsito.

Figura 31 – Tempo médio das viagens

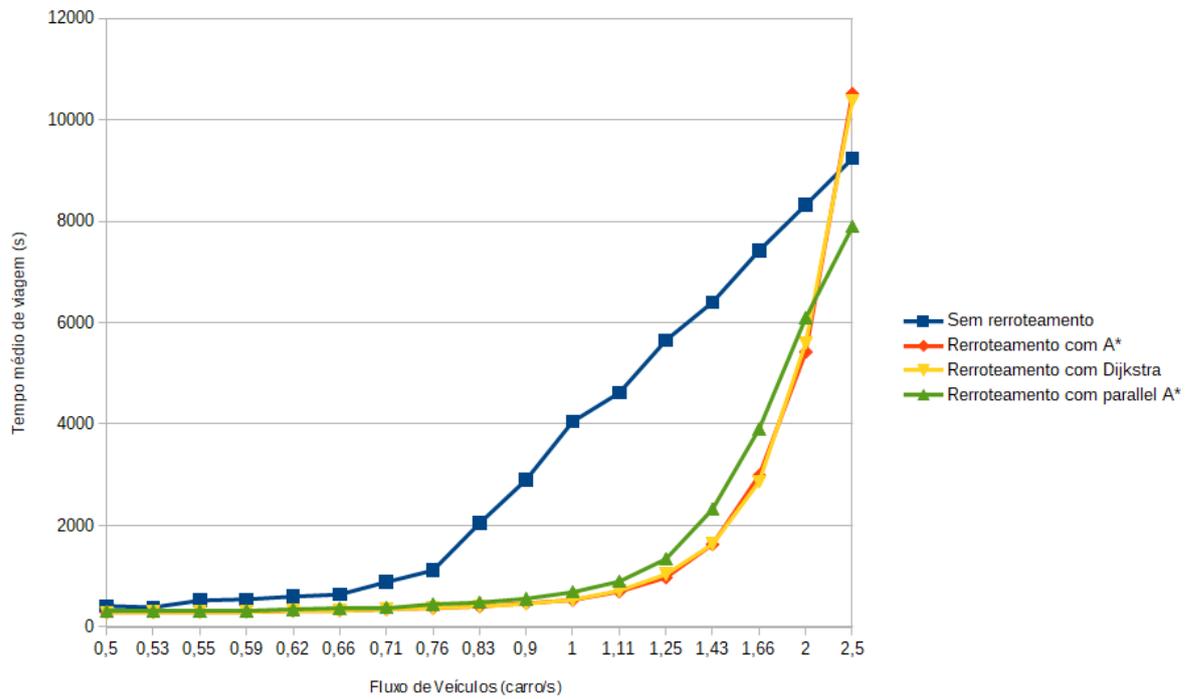
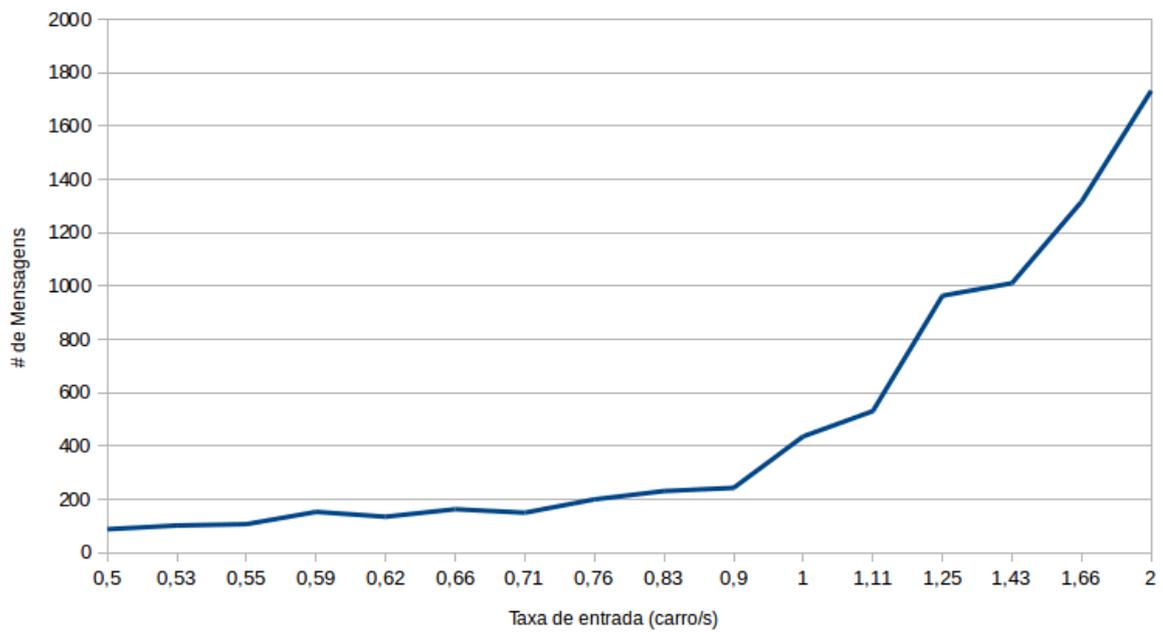


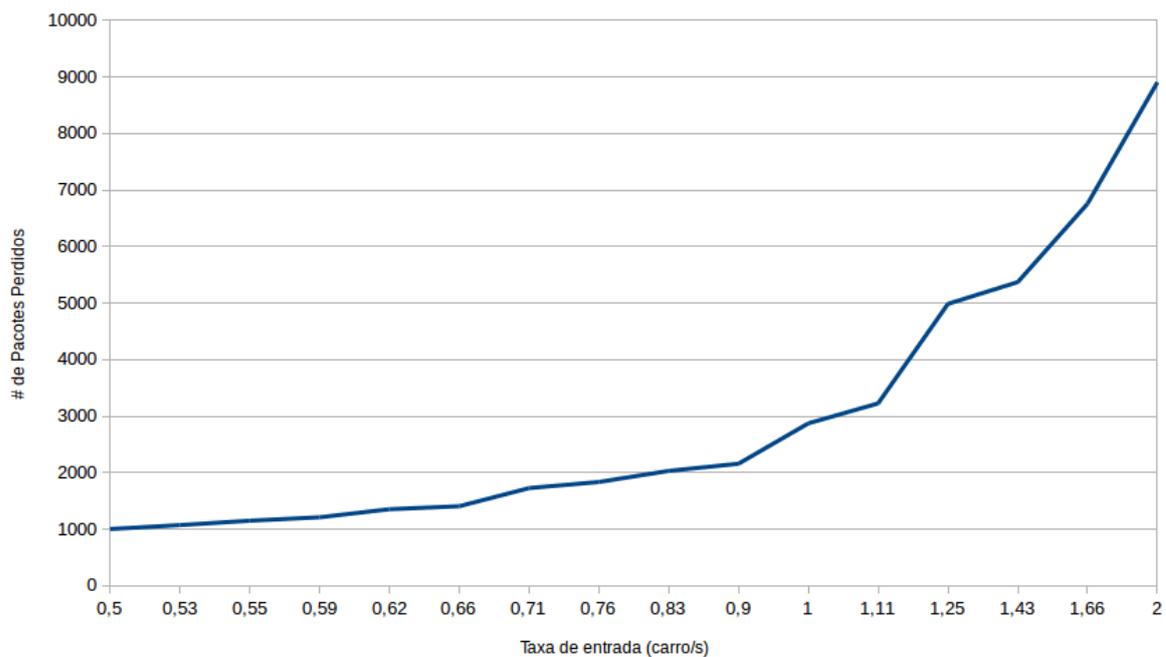
Figura 32 – Mensagens Recebidas



Já a Figura 33 apresenta a quantidade de pacotes perdidos na aplicação modelada. É possível notar que à medida em que o fluxo de entrada de carros cresce, aumentando a densidade de veículos no sistema, a quantidade de pacotes perdidos também cresce. Esse fato se dá devido à forma com que o envio de pacotes da aplicação foi modelado. Na aplicação modelada,

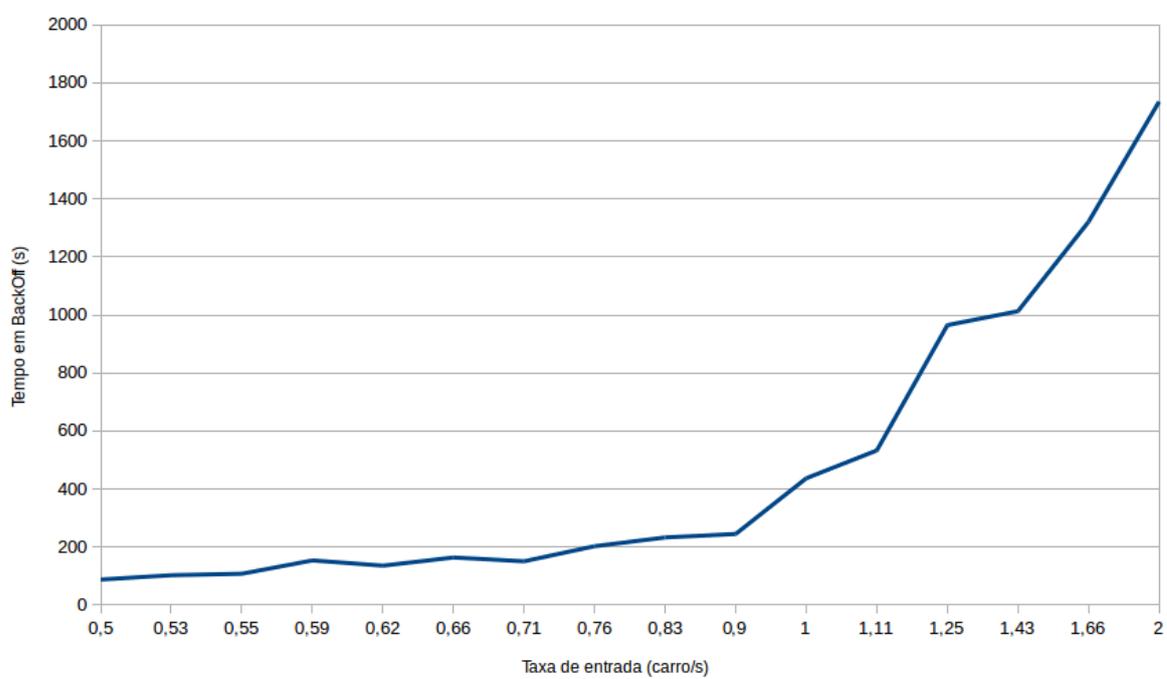
os veículos deveriam notificar todos ao seu alcance quando um congestionamento ocorresse, esse comportamento é problemático porque os carros dentro da área de alcance do notificador provavelmente estariam no mesmo congestionamento, também notificando seus pares. Dessa forma, o meio físico apresentou sobrecarga e pacotes foram perdidos.

Figura 33 – Pacotes Perdidos



A Figura 34 apresenta resultados que reforçam o entendimento do problema da perda de pacotes. É possível perceber que à medida em que a carga aumenta, o intervalo de *backoff* aumenta. O intervalo de *backoff* pode ser definido como o tempo que um nó emissor pode esperar para tentar reenviar um pacote a fim de evitar colisões no meio físico. Esses resultados mostram que a forma que a aplicação foi modelada causou a degradação da rede, haja vista que, há sucessivas notificações de trânsito parado enviadas por um nó a seus vizinhos, que, estando na mesma região congestionada também notificam aos seus vizinhos, desencadeando um problema conhecido como *BroadCast Storm*. Esse problema encontrado pode ser solucionado com uma modelagem adequada da troca de pacotes da aplicação, evitando por exemplo que um veículo notifique sucessivas vezes uma situação sobre a qual seus vizinhos já foram notificados.

Figura 34 – Tempo Backoff



# 6

## Considerações Finais

Neste trabalho foi realizada uma revisão bibliográfica sobre métodos de planejamento de rotas de veículos compartilhando informações através de redes VANETs. A revisão foi realizada através de um mapeamento sistemático da literatura, que respondeu algumas questões de pesquisa com o objetivo de traçar um panorama do tema. Através da revisão, foram identificados algoritmos e estratégias desenvolvidas para o planejamento de rotas de veículos. O algoritmo A\*, e variações do mesmo, foram a abordagem mais frequentemente utilizada nos trabalhos encontrados.

### 6.1 Contribuições

A partir da leitura dos trabalhos relacionados obtidos através do mapeamento sistemático, foi verificado que havia uma lacuna na otimização dos algoritmos utilizados para o planejamento de rotas. Não foram encontrados trabalhos que abordassem a paralelização de algoritmos de planejamento em um sistema de transporte inteligente. Essa otimização foi considerada um dos objetos de estudo, haja vista que a quantidade de veículos processados impactam negativamente o tempo de processamento dos algoritmos não paralelos.

Além disso, foi percebida a necessidade de uma adequação dos *frameworks* de simulação para comportar a execução de algoritmos paralelizados. Essa necessidade demandou o desenvolvimento de uma arquitetura de análise e validação de algoritmos de roteamento que possibilita o acoplamento tanto de algoritmos paralelizados em GPU quanto algoritmos que rodam sobre CPU.

Essa dissertação apresentou uma abordagem do algoritmo A\* desenvolvido para rodar sobre GPU de forma paralela. O algoritmo é parte de um sistema inteligente de transporte a ser implementado em uma cidade inteligente e é focado no planejamento de rotas de veículos para reduzir seus tempos de viagem. Uma arquitetura de validação de algoritmos de planejamento

de rotas veiculares foi desenvolvida para validação do algoritmo paralelizado utilizando os simuladores SUMO, Veins e OMNET++.

A arquitetura desenvolvida foi dividida em três módulos: módulo de comunicação, módulo de mobilidade e módulo de roteamento. Cada módulo é responsável por lidar com uma das grandes características do problema. O módulo de mobilidade se encarrega de lidar com os problemas de trajetória, rede viária e simulação de trânsito em geral; o módulo de comunicação é responsável por lidar com os problemas de rede das aplicações a serem avaliadas, modelagem de pilha de protocolos e etc; já o módulo de roteamento é responsável por realizar e avaliar as estratégias de roteamento, possibilitando o desenvolvimento de algoritmos de planejamento de rotas e análise de seus respectivos impactos em cenários reais. Essa modularização faz com que os problemas de cada uma das áreas esteja autocontido em seu próprio módulo, simplificando a diversa tarefa de avaliar soluções para problemas de gestão de trânsito e mobilidade.

## 6.2 Conclusões

A arquitetura proposta se mostrou relevante por representar o problema de simulação realística de trânsito, comunicação entre veículos e aplicações de planejamento de rotas em três módulos onde a responsabilidade de cada módulo é autocontida. Essa característica possibilita que pesquisadores desenvolvam soluções para cada um dos módulos sem necessariamente se preocupar com os outros módulos. É possível focar em desenvolver algoritmos de planejamento de rotas sem grandes preocupações quanto ao acoplamento da solução ao restante das ferramentas, por exemplo.

Foram obtidos resultados interessantes do ponto de vista de tempo de processamento necessário para os algoritmos Dijkstra e A\* clássicos e o A\* paralelizado que foi desenvolvido. O tempo médio de processamento foi reduzido em no mínimo 10 vezes, e o tempo total de processamento saiu de cerca de 33 minutos para 566 milissegundos, considerando a maior carga simulada. Portanto, o algoritmo proposto apresentou baixo custo em tempo de processamento.

A qualidade das rotas geradas pelo algoritmo A\* paralelizado foi superior aos algoritmos clássicos analisados quando as maiores cargas eram consideradas. Isto é, as rotas geradas foram mais curtas e possuíam um tempo de viagem inferior. A comparação do ganho de velocidade de processamento do A\* paralelizado em relação aos algoritmos seriais avaliados, mostra que a solução A\* paralelizada é mais viável de ser praticada em ambientes reais, ainda que as rotas obtidas tenham apresentado qualidade levemente inferior quando comparadas aos algoritmos clássicos em alguns momentos.

Os resultados da avaliação da aplicação em termos de métricas da rede VANETs não foram satisfatórios. A modelagem da troca de pacotes da aplicação realizada foi deficiente e deve ser encarada como um próximo passo desse trabalho. Haja vista que os resultados obtidos apresentaram um número alto de perda de pacotes degradando a qualidade do sistema de

planejamento de rotas proposto em aplicações reais.

### 6.3 Sugestões de Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros o sistema proposto deve ser avaliado em cenários com mapas e quantidade de veículos maiores. Esse tipo de configuração contribuiria para avaliar sua robustez e escalabilidade em termos algorítmicos. A modelagem da rede VANET realizada deve ser melhorada, o protocolo definido para a aplicação simulada não tratou o reenvio de pacotes para destinatários já cientes da mensagem. Assim, é necessário trabalhar modelos e protocolos de comunicação que evitem a ocorrência do problema de *Broadcast Storm*. Novos algoritmos podem ser desenvolvidos e avaliados na arquitetura de validação apresentada.

A arquitetura desenvolvida nesse trabalho pode ser modificada para suportar a execução de algoritmos em múltiplas GPUs, a fim de proporcionar maior escalabilidade ao sistema de roteamento de veículos. Também é possível avaliar o sistema e algoritmos desenvolvidos em outras tecnologias de rede de comunicação, por exemplo, 5G.

# Referências

- AL-MAYOUF, Y. R. B. et al. Accident management system based on vehicular network for an intelligent transportation system in urban environments. *Journal of Advanced Transportation*, Hindawi, v. 2018, 2018. Citado na página 39.
- BRAGA, M. d. L. et al. Anytime route planning with constrained devices. *Computers & Electrical Engineering*, Elsevier, v. 54, p. 53–67, 2016. Citado na página 40.
- CHANG, C.; HUNG, S.-N.; YEN, C.-E. On design of a dynamic carpooling system based on vehicle information shared through the vanet. In: IEEE. *Systems, Man, and Cybernetics (SMC), 2016 IEEE International Conference on*. [S.l.], 2016. p. 003148–003153. Citado na página 41.
- CHANG, I.-C. et al. A vanet-based a\* route planning algorithm for travelling time-and energy-efficient gps navigation app. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 9, n. 7, p. 794521, 2013. Citado na página 40.
- ÇINAR, A.; KIRAN, M. A parallel version of tree-seed algorithm (tsa) within cuda platform. In: *Selçuk International Scientific Conference On Applied Sciences*. [S.l.: s.n.], 2016. Citado na página 46.
- COHEN, R. et al. A trust-based framework for vehicular travel with non-binary reports and its validation via an extensive simulation testbed. *Journal of Trust Management*, Springer, v. 1, n. 1, p. 2, 2014. Citado na página 41.
- DIJKSTRA, E. W. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische mathematik*, Springer, v. 1, n. 1, p. 269–271, 1959. Citado na página 17.
- EPPSTEIN, D. Finding the k shortest paths. *SIAM Journal on computing*, SIAM, v. 28, n. 2, p. 652–673, 1998. Citado na página 17.
- FERNANDES, L. C. et al. Carina intelligent robotic car: architectural design and applications. *Journal of Systems Architecture*, Elsevier, v. 60, n. 4, p. 372–392, 2014. Citado na página 41.
- FONTANELLI, S.; BINI, E.; SANTI, P. Dynamic route planning in vehicular networks based on future travel estimation. In: IEEE. *Vehicular Networking Conference (VNC), 2010 IEEE*. [S.l.], 2010. p. 126–133. Citado na página 39.
- GARCÍA-MAGARIÑO, I. et al. Abscev: An agent-based simulation framework about smart transportation for reducing waiting times in charging electric vehicles. *Computer Networks*, Elsevier, v. 138, p. 119–135, 2018. Citado na página 38.
- GOVENDER, N.; WILKE, D. N.; KOK, S. Collision detection of convex polyhedra on the nvidia gpu architecture for the discrete element method. *Applied Mathematics and Computation*, Elsevier, v. 267, p. 810–829, 2015. Citado na página 47.
- GUO, C. et al. Real-time path planning in urban area via vanet-assisted traffic information sharing. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, IEEE, 2018. Citado na página 41.

- HABITAT, U. Urbanization and development: emerging futures. *World cities report*, UN Habitat Nairobi, v. 3, n. 4, p. 4–51, 2016. Citado na página 16.
- HART, P. E.; NILSSON, N. J.; RAPHAEL, B. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. *IEEE transactions on Systems Science and Cybernetics*, IEEE, v. 4, n. 2, p. 100–107, 1968. Citado na página 17.
- HE, T.; SHAN, H.; HUANG, A. Decentralized rsu-based real-time path planning for vehicular ad hoc networks. In: IEEE. *Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), 2015 12th Annual IEEE*. [S.l.], 2015. p. 449–454. Citado na página 42.
- HE, Z.; CAO, B.; LIU, Y. Accurate real-time traffic speed estimation using infrastructure-free vehicular networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 11, n. 10, p. 530194, 2015. Citado na página 39.
- HE, Z.; CAO, J.; LI, T. Mice: A real-time traffic estimation based vehicular path planning solution using vanets. In: IEEE. *Connected Vehicles and Expo (ICCVE), 2012 International Conference on*. [S.l.], 2012. p. 172–178. Citado na página 39.
- HUANG, C.-J. et al. Application of cellular automata and type-2 fuzzy logic to dynamic vehicle path planning. *Applied Soft Computing*, Elsevier, v. 19, p. 333–342, 2014. Citado na página 40.
- JAIN, R. *The art of computer systems performance analysis: techniques for experimental design, measurement, simulation, and modeling*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1990. Citado na página 23.
- JONG, G.-J. et al. Using the mimo mechanism to integrate vehicle information process systems in vehicular networks. *Journal of Innovative Computing, Information and Control (IJICIC)*, 2013. Citado na página 40.
- KACHROO, P.; SASTRY, S. Travel time dynamics for intelligent transportation systems: Theory and applications. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, IEEE, v. 17, n. 2, p. 385–394, 2016. Citado na página 16.
- KITCHENHAM, B. Procedures for performing systematic reviews. *Keele, UK, Keele University*, v. 33, n. 2004, p. 1–26, 2004. Citado na página 26.
- KRAJZEWICZ, D. et al. Recent development and applications of SUMO - Simulation of Urban MObility. *International Journal On Advances in Systems and Measurements*, v. 5, n. 3&4, p. 128–138, December 2012. Disponível em: <<http://elib.dlr.de/80483/>>. Citado na página 51.
- KWAK, D. et al. Seeing is believing: Sharing real-time visual traffic information via vehicular clouds. *IEEE Access*, IEEE, v. 4, p. 3617–3631, 2016. Citado na página 42.
- LCAD/UFS. *Laboratório de Computação de Alto Desempenho*. 2017. <<http://www2.lcad.ufs.br/apresentacao>>. Acessado em 09/11/2017. Citado na página 53.
- LEI, T. et al. A cooperative route choice approach via virtual vehicle in iov. *Vehicular Communications*, Elsevier, 2017. Citado na página 38.
- LI, G.; HE, B.; DU, A. A traffic congestion aware vehicle-to-vehicle communication framework based on voronoi diagram and information granularity. *Peer-to-Peer Networking and Applications*, Springer, p. 1–15, 2016. Citado na página 42.

- LIU, R. et al. Balanced traffic routing: Design, implementation, and evaluation. *Ad Hoc Networks*, Elsevier, v. 37, p. 14–28, 2016. Citado na página 40.
- NAJADA, H. A.; MAHGOUB, I. Autonomous vehicles safe-optimal trajectory selection based on big data analysis and predefined user preferences. In: IEEE. *Ubiquitous Computing, Electronics & Mobile Communication Conference (UEMCON), IEEE Annual*. [S.l.], 2016. p. 1–6. Citado na página 42.
- NOORI, H.; VALKAMA, M. Impact of vanet-based v2x communication using ieee 802.11 p on reducing vehicles traveling time in realistic large scale urban area. In: IEEE. *Connected Vehicles and Expo (ICCVE), 2013 International Conference on*. [S.l.], 2013. p. 654–661. Citado na página 41.
- PAPADIMITRATOS, P. et al. Vehicular communication systems: Enabling technologies, applications, and future outlook on intelligent transportation. *IEEE Communications Magazine*, IEEE, v. 47, n. 11, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 19.
- PETERSEN, K. et al. Systematic mapping studies in software engineering. In: *EASE*. [S.l.: s.n.], 2008. v. 8, p. 68–77. Citado na página 25.
- QIAN, J. et al. Accelerating reconfiguration for vlsi arrays with a-star algorithm. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, Wiley Online Library, v. 13, n. 10, p. 1511–1519, 2018. Citado na página 47.
- REGRAGUI, Y.; MOUSSA, N. Investigating the impact of real-time path planning on reducing vehicles traveling time. In: IEEE. *Advanced Communication Technologies and Networking (CommNet), 2018 International Conference on*. [S.l.], 2018. p. 1–6. Citado na página 42.
- REWADKAR, D.; DOYE, D. Fgwso-tar: Fractional glowworm swarm optimization for traffic aware routing in urban vanet. *International Journal of Communication Systems*, Wiley Online Library, v. 31, n. 1, p. e3430, 2018. Citado na página 40.
- SALEH, Y.; TOFIGH, A.; ZAHRA, A. Transportation routing in urban environments using updated traffic information provided through vehicular communications. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, Elsevier, v. 14, n. 5, p. 23–36, 2014. Citado na página 40.
- SCHRANK, D.; EISELE, B.; LOMAX, T. Tti’s 2019 urban mobility report. *Texas A&M Transportation Institute. The Texas A&M University System*, p. 50, 2019. Citado na página 17.
- SHEN, Y. et al. Saint+: Self-adaptive interactive navigation tool+ for emergency service delivery optimization. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, IEEE, 2018. Citado na página 42.
- SHIMOURA, H.; TENMOKU, K. Development of elemental algorithms for future dynamic route guidance system. In: IEEE. *Vehicle Navigation and Information Systems Conference, 1994. Proceedings., 1994*. [S.l.], 1994. p. 321–326. Citado na página 16.
- SOMMER, C. *Veins Documentation*. 2019. <<https://veins.car2x.org/documentation/>>. [Online; accessed 22-July-2019]. Citado na página 52.
- SOMMER, C.; GERMAN, R.; DRESSLER, F. Bidirectionally coupled network and road traffic simulation for improved ivc analysis. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, IEEE, v. 10, n. 1, p. 3–15, 2011. Citado na página 38.

- SOMMER, C. et al. On the feasibility of umts-based traffic information systems. *Ad Hoc Networks*, Elsevier, v. 8, n. 5, p. 506–517, 2010. Citado na página 38.
- SUMRA, I. A. et al. Classes of attacks in vanet. In: IEEE. *Electronics, Communications and Photonics Conference (SIEPC), 2011 Saudi International*. [S.l.], 2011. p. 1–5. Citado na página 17.
- SYSTEMATICS, C. et al. Traffic congestion and reliability: Trends and advanced strategies for congestion mitigation. *Final Report, Texas Transportation Institute*. [http://ops.fhwa.dot.gov/congestion\\_report\\_04/index.htm](http://ops.fhwa.dot.gov/congestion_report_04/index.htm), 2005. Citado na página 18.
- THULASIRAMAN, P.; CLARK, G. A.; BEACH, T. M. Applying location estimation for reliable routing in tactical unmanned ground vehicle networks. *Peer-to-Peer Networking and Applications*, v. 4, n. 10, p. 1034–1050, 2017. Citado na página 39.
- VALIBAK, A. et al. A two-purpose peer-to-peer structure for vehicle navigating and traffic information disseminating in vehicular networks. In: IEEE. *Computer and Knowledge Engineering (ICCKE), 2014 4th International eConference on*. [S.l.], 2014. p. 316–321. Citado na página 41.
- WANG, M. et al. Real-time path planning based on hybrid-vanet-enhanced transportation system. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, IEEE, v. 64, n. 5, p. 1664–1678, 2015. Citado na página 38.
- WANG, W. et al. Green intelligent transport system. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, Hindawi Publishing Corporation, v. 2014, 2014. Citado na página 18.
- WEGENER, A. et al. Hovering data clouds: A decentralized and self-organizing information system. *Lecture notes in computer science*, Springer, v. 4124, p. 243, 2006. Citado na página 42.
- XU, Y. et al. Detecting urban road condition and disseminating traffic information by vanets. In: IEEE. *Ubiquitous Intelligence and Computing and 2015 IEEE 12th Intl Conf on Autonomic and Trusted Computing and 2015 IEEE 15th Intl Conf on Scalable Computing and Communications and Its Associated Workshops (UIC-ATC-ScalCom), 2015 IEEE 12th Intl Conf on*. [S.l.], 2015. p. 93–98. Citado na página 41.
- YANG, J.-Y. et al. Autonomic navigation system based on predicted traffic and vanets. *Wireless Personal Communications*, v. 2, n. 92, p. 515–546, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 39 e 42.
- YANG, Y.; BAGRODIA, R. Evaluation of vanet-based advanced intelligent transportation systems. In: ACM. *Proceedings of the sixth ACM international workshop on Vehicular InterNetworking*. [S.l.], 2009. p. 3–12. Citado na página 38.
- YOUSEFI, S.; MOUSAVI, M. S.; FATHY, M. Vehicular ad hoc networks (vanets): challenges and perspectives. In: IEEE. *ITS Telecommunications Proceedings, 2006 6th International Conference on*. [S.l.], 2006. p. 761–766. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 19.
- ZHANG, W. et al. Diftos: A distributed infrastructure-free traffic optimization system based on vehicular ad hoc networks for urban environments. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 18, n. 8, p. 2567, 2018. Citado na página 43.
- ZHOU, Y. et al. Parallel ant colony optimization on multi-core simd cpus. *Future Generation Computer Systems*, Elsevier, v. 79, p. 473–487, 2018. Citado na página 46.

---

ZHOU, Y.; ZENG, J. Massively parallel a\* search on a gpu. In: *Twenty-Ninth AAAI Conference on Artificial Intelligence*. [S.l.: s.n.], 2015. Citado na página [46](#).